

**PROCEDIMIENTOS PARA EL ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS
CONTINENTALES RELACIONADOS CON LOS AFLORAMIENTOS DE CIANOBACTERIAS**



Proyecto CianoMOD
2021

**PROCEDIMIENTOS PARA EL ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS
CONTINENTALES RELACIONADOS CON LOS AFLORAMIENTOS DE CIANOBACTERIAS**

Coordinación y Edición:

Juan Antonio Pascual Aguilar

Jesús Morón

Ángel Pompa

Equipo redactor (orden alfabético):

Rafael Belda Carrasco^d

Francisco Carreño^b

Ana E. Garcia Sipols^b

Irene Mariñas del Collado^b

Myriam Mateos-Fernández^b

Jesús Morón López^c

Juan Antonio Pascual Aguilar^a

Angel G. Pompa Pernia^a

María Cristina Rodríguez-Sánchez^b

Clara Simón de Blas^b

Joaquín Vaquero^b

Afiliaciones:

^a Instituto IMDEA Agua

^b Universidad Rey Juan Carlos-URJC

^c European Regional Centre for Ecohydrology of the Polish Academy of Science

^d Centro para el Conocimiento del Paisaje

Proyecto:

CianoMOD: Desarrollo de un modelo predictivo para la gestión de eventos de proliferación de algas y cianobacterias asociadas al cambio climático basado en técnicas de teledetección y sistemas de adquisición de datos

Con el apoyo de:



Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor o autores de los mismos, y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto

Alcalá de Henares, Agosto de 2021

Contenidos

Sección	Página
Introducción	1
Puesta en valor de datos existente	6
A.1. Exploración y uso de series históricas de datos	7
A.2. La aplicación de Sistemas de Información Geográfica para el análisis contextual basado en la dinámica espacio-temporal de los usos del suelo	35
A.3. Uso de la teledetección para la evaluación de las masas de agua	55
B. Estrategias integradas para la implementación de sistemas autónomos de mediciones constantes	74
B.1. Redes de sensores de medición continua de parámetros de calidad del agua relacionados con la potencial presencia de cianobacterias. El sistema de monitorización del proyecto CianoMOD	75
B.2. Sistemas abiertos para la consulta de datos en tiempo real en Internet	93
C. Consideraciones finales	117
Bibliografía consultada	121

Introducción

El ser humano ha ejercido un alto impacto en las masas de agua continentales de todo el mundo, modificando el hábitat, contaminando el medio y sobreexplotando los recursos naturales. La liberación de nutrientes al agua provenientes del desarrollo urbano, agrícola e industrial, y su acumulación excesiva en el medio -fenómeno conocido como eutrofización- es el proceso de contaminación más influyente en lagos, ríos y embalses. Una de sus consecuencias directas son los Florecimientos de Algas Nocivas (FAN, en inglés, *Harmful Algae Blooms, HABs*), con un penetrante impacto de cianobacterias. Las FAN provocan multitud de efectos adversos en la calidad de las aguas y suponen un grave riesgo para los ecosistemas acuáticos y la salud humana. Es por ello que, en un contexto de Agenda 2030, donde se detallan los Objetivos de Desarrollo Sostenible y se incluye el objetivo 6 para garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos, es de vital importancia empoderar a los organismos gestores del agua con herramientas útiles que permitan reconocer, entender y abordar el riesgo asociado a los usos del agua continental.

¿QUÉ SON LAS CIANOBACTERIAS?

Las cianobacterias, también conocidas como algas verdes-azuladas, son bacterias que aparecieron hace unos 2.700 millones de años en la Tierra y que han tenido un papel fundamental en el desarrollo de la vida aeróbica gracias a su capacidad para realizar la fotosíntesis oxigénica. Existen tanto en ecosistemas terrestres como acuáticos y en diversas formas de vida, como unicelulares, coloniales o filamentosas (figura 1). Los géneros más frecuentes son *Microcystis*, *Dolichospermum* (anteriormente *Anabaena*), *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis*, *Lyngbya*, *Oscillatoria*, *Phormidium* y *Planktothrix*. Estos están presentes de manera natural en las aguas superficiales en concentraciones bajas o moderadas, con una presencia particular a modo de FAN en aguas eutróficas e hipertróficas, aunque su proliferación masiva puede aparecer incluso en aguas prístinas sin impacto antropogénico.

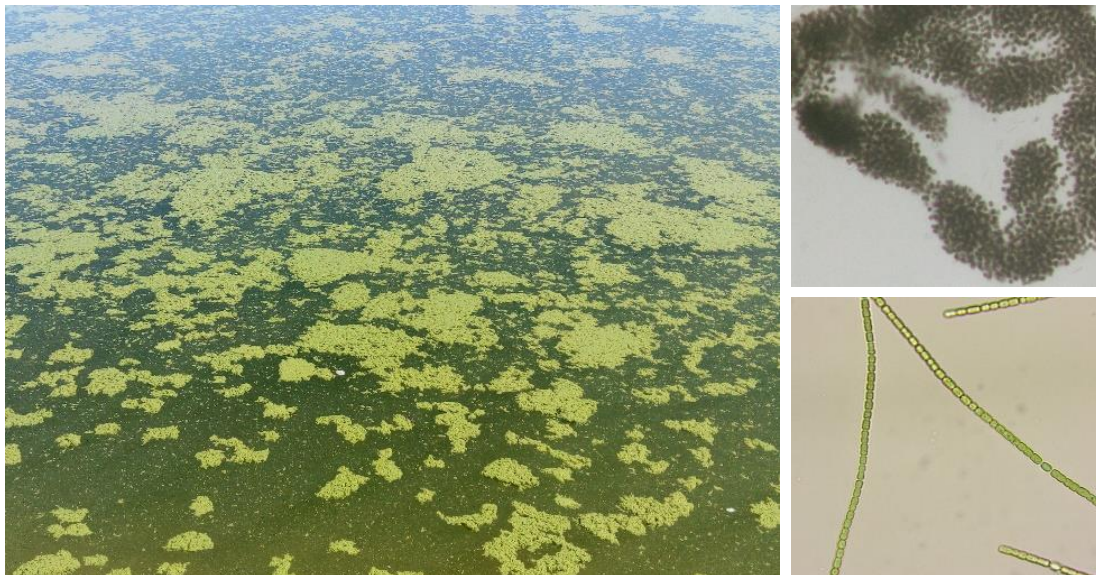


Figura 1. Imagen de un afloramiento de cianobacterias (izquierda) y fotografías captadas bajo el microscopio óptico (derecha) de los géneros *Microcystis* (arriba) y *Aphanizomenon* (abajo).

Los afloramientos son un fenómeno de aparición rápida que se caracteriza por el dominio de una o pocas especies de fitoplancton. Con frecuencia, algunas especies de cianobacterias son las dominantes, gracias a la amplia variedad de estrategias adaptativas que presentan en comparación con otros congéneres de la comunidad fitoplanctónica. Por ejemplo, la presencia de pigmentos, como las clorofilas, la ficocianina o la ficoeritrina, les permiten captar un amplio rango del espectro lumínico

y alcanzar longitudes de onda solo accesibles para ciertos organismos. Las cianobacterias también son muy competitivas a altas temperaturas, y ciertas especies han desarrollado la capacidad de flotación como adaptación para permanecer en las capas superiores de la columna de agua. Esta ventaja adaptativa les permite absorber una mayor cantidad de luz que sus oponentes no flotantes, lo que podría incluso aumentar eventualmente la temperatura de las zonas superficiales actuando como retroalimentación positiva. Además, los eventos de sequía desencadenan aumentos de salinidad en las masas de agua continentales, lo que favorece el éxito de las cianobacterias como resultado de su tolerancia a la sal. Por tanto, debido al *fitness* de estos microorganismos y a los múltiples factores que favorecen su proliferación masiva, su aparición se está convirtiendo en un problema común muy difícil de abordar.

EFFECTO DE LAS CIANOBACTERIAS SOBRE LA SALUD HUMANA Y LA CALIDAD DEL AGUA

El crecimiento masivo de algas y cianobacterias produce graves efectos adversos sobre la calidad de las aguas, provocando, entre otros efectos, malos olores y sabores, pérdida de biodiversidad y, en el caso de ciertas especies de cianobacterias, la producción de compuestos tóxicos llamados cianotoxinas. Estas toxinas tienen una variedad de efectos nocivos sobre la salud animal y humana, cuyos síntomas agudos van desde gastroenteritis, fiebre e irritación de la piel, ojos, garganta y tracto respiratorio, hasta daño hepático y neurotoxicidad. Por otro lado, los afloramientos en aguas superficiales impactan gravemente la vida acuática, ya que la reducción de la entrada de luz en la columna de agua causa la muerte de los organismos fotosintéticos bentónicos. Además, cuando el afloramiento decae y las células de algas y cianobacterias comienzan a morir, la descomposición aerobia de la biomasa puede causar un drástico descenso del oxígeno disuelto, provocando la muerte de los animales acuáticos por asfixia. Como consecuencia a todos estos efectos negativos, los afloramientos de algas y cianobacterias suelen dar lugar a cuantiosas pérdidas económicas en la salud pública, la pesca, la agricultura, el abastecimiento de agua potable, el uso recreativo de las aguas y el turismo.

Los afloramientos aumentan en intensidad cada año, y son un problema que afecta a la mayoría de los lagos y embalses eutróficos de todo el mundo, como al lago Victoria en África, el lago Erie en América del Norte o el lago Taihu en China. A nivel nacional, alrededor del 35-40% de los embalses españoles sufren de afloramientos tóxicos de cianobacterias. Por ejemplo, el embalse de As Conchas, situado en el parque natural de la Baixa Limia-Serra do Xurés, demarcación hidrográfica del Miño-Sil, sufre una intensa eutrofización debida a la deficiente depuración de las aguas residuales en la cabecera del río Limia y a la fortísima contaminación agroganadera difusa en la llanura de Limia. La concentración de cianobacterias ha llegado a sobrepasar casi 4 veces los niveles de Alerta 2 de la Organización Mundial de la Salud (OMS), provocando varios cortes del suministro de agua a la población y la restricción de las actividades recreativas en el medio acuático. Asimismo, la laguna poco profunda de La Albufera en Valencia (situada al Este de España) es un humedal característico de los entornos costeros mediterráneos y que también se ve afectado por las FAN. Las actividades humanas ejercen presiones significativas sobre esta laguna, ya que la mayor parte del agua entrante está tradicionalmente regulada por las necesidades del cultivo del arroz y los vertidos de aguas residuales. La aparición de cianobacterias en la laguna somera de La Albufera sigue un patrón espaciotemporal relacionado con la estacionalidad y la fuerte presión antrópica, lo que la convierte en una laguna altamente eutrófica cuya recuperación a un estado óptimo es difícil.

LEGISLACIÓN

La gran preocupación a escala global sobre la eutrofización de los ecosistemas acuáticos y la intensificación de los afloramientos tóxicos ha dado lugar a realizar una legislación al respecto. La

Directivas Europeas 2000/60/CE Marco del Agua y la 2006/118/CE, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres, establecen la necesidad de preservar y conservar la salud de las masas de agua europeas, incluyendo el buen estado fisicoquímico y biológico de las mismas. En España, el RD 134/2007 transpone la Directiva Europea a la legislación española. Asimismo, la OMS ha establecido unos umbrales guía para ciertas toxinas producidas por cianobacterias (como las microcistinas) para las aguas dedicadas a uso recreativo y consumo humano. Posteriormente, esta recomendación fue trasladada a la legislación española a través del RD 140/2003. Además, según el artículo 7 de este Real Decreto, se establece que los Organismos de Cuenca y las Administraciones Hidráulicas de las Comunidades Autónomas deberían incluir a las cianobacterias dentro de la vigilancia de las aguas destinadas a la producción de agua para consumo. Por lo tanto, es suma importancia implementar programas de monitorización continua de la calidad de las aguas superficiales para cumplir los requerimientos que exige la legislación.

INDICADORES DE LA APARICIÓN DE LOS AFLORAMIENTOS

Un crecimiento de algas y cianobacterias es considerado afloramiento cuando supera las 20.000 células/mL o los 10 µg/L de clorofila A (figura 1); sin embargo, pueden aparecer picos entre 30 y 300 veces superiores (es decir, 300 o 3000 µg/L de clorofila A) en aguas eutróficas e hipertróficas. La formación de los afloramientos puede estar influenciada por múltiples factores abióticos que pueden correlacionarse y/o combinarse entre sí. A su vez, los afloramientos pueden generar cambios en las características fisicoquímicas del agua. A continuación, se detallan algunos de estos factores:

TEMPERATURA

Diversos estudios demuestran la influencia de la temperatura en el crecimiento exponencial de algas y cianobacterias. En concreto, el óptimo de crecimiento de las cianobacterias en climas templados está situado por encima de 25°C. Al mismo tiempo, el aumento de las temperaturas produce fuertes y largos periodos de estratificación vertical en la columna de agua en lagos y embalses, evitando la mezcla del agua con distintas densidades. Esto genera capas de agua superficiales cálidas y nutritivas, donde los organismos fotosintéticos se acumulan y proliferan masivamente.

PH

El pH es un factor que indica la acidez o alcalinidad del agua y que depende principalmente de la actividad de los microorganismos acuáticos. En lagos y embalses, el valor del pH se encuentra normalmente entre 6 y 8.5, con una variación espaciotemporal. En las zonas profundas, pobres en O₂, el pH es más ácido debido a la producción de CO₂ por la respiración de los organismos heterótrofos y la producción de ácidos húmicos y otros compuestos provenientes de la mineralización de la materia orgánica. En las zonas superficiales, el valor del pH se encuentra en el intervalo de 6 a 8,5 que, debido a la actividad fotosintética del fitoplancton, tiende a la alcalinidad. Cuando se produce el crecimiento masivo de algas y cianobacterias, el pH puede aumentar hasta niveles de 10±1.

OXÍGENO DISUELTO

El valor del oxígeno disuelto presente en las masas de agua es indicativo de la producción primaria, del estado de óxido-reducción de los compuestos inorgánicos y de la salud de la fauna acuática. La solubilidad del oxígeno depende de factores abióticos como la presión, la conductividad y principalmente de la temperatura. Los valores anuales de oxígeno disuelto suelen mostrar una variación estacional con valores mínimos en la estación cálida, coincidente con la temperatura máxima, y valores altos en la estación fría. La variación estacional del oxígeno disuelto también es consecuencia de la producción primaria total y del fitoplancton. Durante el crecimiento exponencial de las algas y cianobacterias, el oxígeno disuelto tiende a subir a causa de la actividad fotosintética,

mientras que éste tiende a descender en las etapas finales del afloramiento a consecuencia de la elevada tasa de respiración de los microorganismos que lo descomponen. No obstante, el oxígeno disuelto del agua superficial está en equilibrio constante con el oxígeno de la atmósfera, lo que influye en su dinámica durante los afloramientos. Por el contrario, en aguas más profundas, la anoxia se acentúa provocando un ambiente reducido que fomenta la liberación de nutrientes de los sedimentos, incentivando aún más el crecimiento del fitoplancton. Cabe destacar que, aunque el oxígeno disuelto puede ser un buen indicador, en algunos casos las alarmas de la disminución del oxígeno disuelto se retrasan en comparación con otros indicadores.

CONDUCTIVIDAD

La conductividad mide el nivel de electrolitos disueltos en el agua. Es un factor relacionado con la geología de la cuenca de los embalses, lagos y ríos que desembocan en el mismo. Una medida de conductividad baja (expresada en $\mu\text{S}/\text{cm}$) indica una buena calidad. Además, el valor de este parámetro puede variar según la estación del año, ya que su valor es dependiente de factores ambientales como la tasa evaporación, que a su vez depende de la temperatura, y de la cantidad de precipitación. La conductividad del agua puede ser un parámetro de valor para estudiar los afloramientos, ya que, además de ser un indicativo de la salinidad, el crecimiento masivo de algas y cianobacterias también puede tener un efecto en el aumento de la conductividad del agua.

NUTRIENTES

Tanto las fuentes de fósforo como las de nitrógeno generan un efecto directo en el crecimiento de los microorganismos y, por tanto, en los afloramientos de algas y cianobacterias. Por un lado, investigaciones realizadas en los años setenta en el área de los lagos experimentales de Canadá demostraron el papel clave desempeñado por el fósforo en la eutrofización de los lagos templados. Estudios posteriores han determinado que las diferentes concentraciones de fósforo en el agua dan lugar al crecimiento de determinados géneros y especies de cianobacterias. Por ejemplo, altas concentraciones de fósforo en el agua fomentan floraciones de especies como *Planktothrix* y *Dolichospermum*, mientras que cianobacterias como *Microcystis* prosperan en aguas superficiales bajas en fósforo, condiciones que son comunes en muchos lagos templados a finales del verano.

Por otro lado, aunque el fósforo ha sido tradicionalmente considerado el nutriente clave en la aparición de los afloramientos en agua dulce, recientes estudios realizados en laboratorio y en lagos de todo el mundo demuestran que el nitrógeno también puede ser importante para controlar la aparición, la densidad y la toxicidad de algunos afloramientos. Las cianobacterias fijadoras de N_2 atmosférico (diazótrofas), como *Dolichospermum*, dominan en ambientes ricos en fósforo y con una baja carga externa de nitrógeno, mientras que se ha observado que el aumento de la biomasa de las cianobacterias no diazótrofas, como *Microcystis* y *Planctotrix*, se correlaciona con el aumento de la concentración de nitrógeno en el agua. Además, más allá de la influencia del nitrógeno en la aparición de cianobacterias, hay evidencia de que la toxicidad de las floraciones formadas por *Microcystis* y otras cianobacterias toxigénicas está muy influenciada por la disponibilidad de nitrógeno.

MONITORIZACIÓN

Con el objetivo de gestionar de manera íntegra los recursos hídricos, detectar y controlar los contaminantes asociados y evaluar las políticas de protección ambiental, es importante monitorizar la calidad de las masas de agua. Durante décadas, los organismos de gestión del agua han realizado numerosos esfuerzos para seguir y modelar la dinámica de las FAN mediante el muestreo manual del agua. Sin embargo, esta técnica tradicional de monitoreo es limitada debido a la dinámica de aparición y distribución de los afloramientos. Por ejemplo, muchos afloramientos de algas y cianobacterias en aguas

superficiales son de corta duración (horas o días), mientras que los muestreos manuales suelen realizarse a una frecuencia baja (desde muestreos semanales hasta bimensuales), y los resultados analíticos se retrasan horas o días, lo que reduce la capacidad de respuesta. Además, el aumento de la frecuencia de muestreo suele ser inviable debido al coste asociado a los análisis de laboratorio.

Como alternativa, los programas de vigilancia modernos están empezando a incluir sistemas de monitorización remota para una vigilancia continua y autónoma. Estos programas de monitoreo incluyen el seguimiento de las masas de agua mediante imágenes vía satélite y la utilización de sistemas de monitorización automática de alta frecuencia. Las imágenes de satélite permiten ampliar la zona de vigilancia mediante la medición de las diferentes longitudes de onda reflejadas por los pigmentos fotosintéticos de las algas y cianobacterias a lo largo de las masas de agua. Por otro lado, los sistemas de monitorización automática de alta frecuencia permiten la conexión sistemática (incluso en tiempo real) entre los usuarios y el entorno natural mediante el despliegue de sensores en boyas. En los últimos años, estos sistemas han aumentado no solo la frecuencia de las mediciones, sino también el número de variables que se monitorean en el agua. Los sensores disponibles en el mercado pueden detectar múltiples parámetros relacionados con el crecimiento y la distribución de las algas y cianobacterias; por ejemplo, los pigmentos fotosintéticos (clorofilas, ficocianinas, ficoeritrinas), la turbidez, los nutrientes, el pH, la temperatura, el oxígeno disuelto, la salinidad, la irradiación solar, la velocidad y dirección del viento, las precipitaciones, etc. De esta forma, la combinación de múltiples metodologías, apoyada por el procesamiento avanzado de datos, ayudaría a desarrollar sistemas de previsión precisos, ofreciendo así un marco para una estrategia de prevención y mitigación adecuada.

OBJETIVOS

Este manual pretende desvelar los conocimientos adquiridos durante la ejecución del proyecto CianoMOD, desarrollado en dos masas de agua españolas con características diferentes: el embalse de agua dulce de As Conchas (Galicia) y la Laguna de agua salobre de L'Albufera (Valencia). Este proyecto ha desarrollado una metodología innovadora que permite a los organismos públicos y privados monitorizar el desarrollo de las FAN de forma autónoma y en tiempo real, mediante la combinación de tecnologías basadas en redes de sensores inalámbricas y la teledetección. La recogida masiva de datos (BigData) permitirá elaborar modelos estadísticos que analicen la vulnerabilidad de los entornos y alerten de la aparición de los afloramientos. Además, con el objetivo de ofrecer una solución de acceso a los datos en abierto, los datos masivos recogidos son visibles a través de una aplicación web y móvil multiplataforma. Las siguientes secciones recogen toda la información relevante para replicar el sistema en otras zonas en riesgo de afloramientos.

A. Puesta en valor de datos existente

A.1. Exploración y uso de series históricas de datos

1. Justificación

El uso de información ambiental existente posee potenciales merecedores de ser explorados. Gran parte de estos datos son recogidos por distintas agencias para el seguimiento de criterios de calidad ambiental como puede ser el agua o el aire. Con el tiempo, las redes utilizadas para el seguimiento de las características ambientales, poseen un alto valor para aplicaciones que van más allá de los fines para los que fueron creadas, pues contienen una gran variedad de parámetros ambientales que han sido medidos periódicamente a lo largo del tiempo.

Algunos de estos parámetros pueden ser también de interés para el seguimiento y evaluación temporal del comportamiento de las cianobacterias, ya que puede asumirse que la respuesta de las cianobacterias dependerá también de ciertas características ambientales que influirán en su presencia y proliferación.

En este trabajo, el análisis de series históricas se realiza para establecer una secuencia lógica que permita determinar la posibilidad de utilizar datos existentes medidos por organismos oficiales. Con el tiempo, la medición continuada de parámetros ambientales relativos a características climáticas y de calidad de aguas continentales acumula series que podrían permitir la valoración histórica de tendencias de algunas características ambientales. Sin embargo, previo a la utilización de los datos existentes, es necesario un análisis exploratorio de los mismos para determinar la integridad de las series (mediciones persistentes de parámetros objetivo) que permitan realizar análisis y comparaciones a largo plazo (décadas) y la consistencia de las mediciones. En consecuencia, para la exploración de largas series de datos ambientales es conveniente que se utilicen técnicas suficientemente robustas para el análisis de los datos que permitan establecer su utilidad y potencial de análisis.

El objetivo general de este capítulo es el establecer criterios que permitan la utilización de largas series de datos, tanto climáticos como de calidad del agua, de masas de aguas continentales, tomando como referencia el embalse de As Conchas y la Albufera de Valencia. El estudio incluye la identificación de los organismos productores de datos, procedimientos para la determinación de estaciones de referencia, el análisis de consistencia temporal de las mediciones y la determinación de parámetros objetivo relacionados con la potencial presencia de cianobacterias y el análisis de parámetros relacionados con la potencial presencia de cianobacterias.

El proceso de análisis ha permitido establecer un lapso de tiempo consistente de análisis dentro del marco de referencia de los últimos 21 años (13 años para la Albufera de Valencia y 11 para el embalse de As Conchas). También se ha podido identificar un conjunto mínimo, pero suficiente, de parámetros climáticos y de calidad del agua que pueden correlacionarse continuamente en el lapso de tiempo establecido, así como el análisis de tendencias temporales de la clorofila en ambas masas de agua.

Finalmente, en base a los datos históricos disponibles en cada entorno, se han analizado los diferentes parámetros relacionados con la presencia de algas y cianobacterias. En concreto, se han evaluado y relacionado los datos climáticos y de calidad de agua a lo largo del tiempo en ambas masas de agua. Los datos de clorofila A aportados por los organismos gestores han servido para realizar un estudio de vulnerabilidad basado en los diferentes umbrales de alerta recomendados por la Organización Mundial de la salud (OMS), los cuales establecen el riesgo potencial de las masas de agua frente a floramientos nocivos de algas y cianobacterias para usos recreativos y de consumo.

2. Procedimiento

Se ha diseñado una metodología que consta de cinco fases (Figura 1). Independientemente de las técnicas empleadas, cada una de ellas tiene un procedimiento exclusivo que la identifica (figura 1, columna derecha), quedando determinado por el objetivo general perseguido (figura 1, columna izquierda). Sin embargo, cada fase es necesaria para continuar en la siguiente. De esa manera, se integra una secuencia de causa-efecto que va desde la identificación de las fuentes de datos (Fase 1), la identificación de los datos y su relación con las masas de agua de interés (Fase 2), el análisis de integridad temporal de las series de datos (Fase 3), la idoneidad de los parámetros para establecer análisis temporales (Fase 4) y la exploración práctica de algún parámetro con el que se puedan establecer tendencias históricas (Fase 5). El procedimiento detallado a seguir en cada una de las fases se relaciona a continuación.

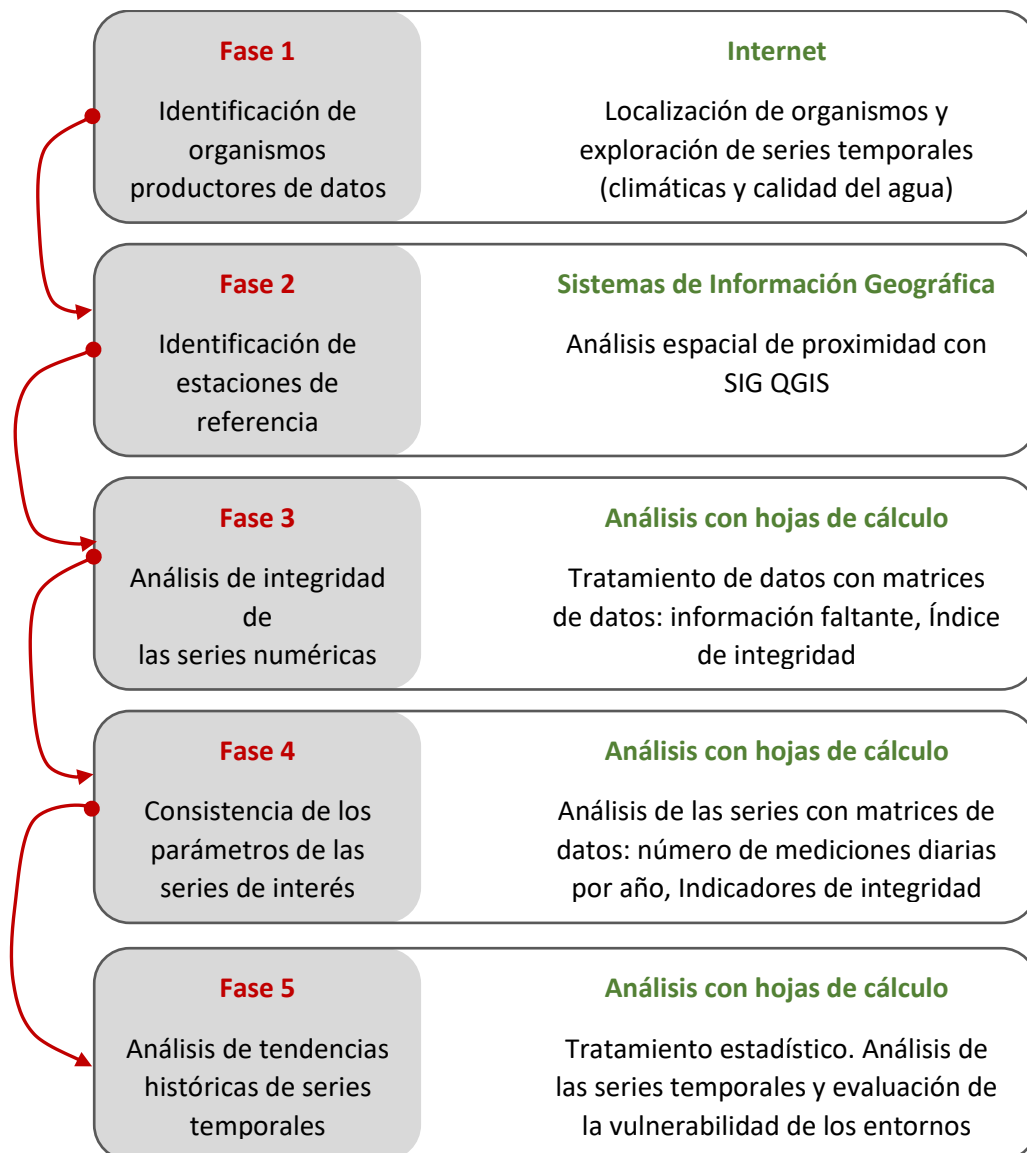


Figura 1. Fases en las que se divide el procedimiento metodológico para la exploración de datos (climáticos y de calidad de agua) existentes en distintos organismos oficiales. Izquierda: objetivo de la fase, derecha: resumen del procedimiento seguido.

2.1. Fase 1. Identificación de organismos productores de información relacionada con la presencia potencial de afloramientos de cianobacterias

Objetivos

- Determinar los organismos competentes en gestión ambiental que registran datos climatológicos y de calidad del agua.
- Identificar las series temporales existentes en los repositorios de datos de los organismos objetivo.
- Establecer el procedimiento a seguir para la obtención de las series de datos identificadas como relevantes para el análisis histórico de parámetros.

Metodología

- Identificación de los organismos de acuerdo a las características de localización de la masa de agua bajo interés, en nuestro caso, el Embalse de As Conchas y la Albufera de Valencia. Para ello se consultan páginas WEBS generalistas como la Infraestructura de Datos Espaciales, o más específicas como las de las Confederaciones Hidrográficas.
- Análisis de las páginas web de los organismos objetivo identificados en el paso anterior. Se trata de identificar la forma de presentar los datos, su accesibilidad y los puntos de muestreo con series temporales susceptibles de ser utilizadas en el análisis temporal.
- Obtención de las series temporales de interés, por medio de la descarga directa de los datos cuando existen sistemas interactivos en las páginas web identificadas o, si así se requiere, la solicitud de los datos al organismo competente.

2.2. Fase 2. identificación de estaciones de referencia (puntos de muestreo)

Objetivos

- Determinación de estaciones meteorológicas y puntos de muestreo de calidad del agua de referencia para las masas de agua de interés.
- Análisis espacial de proximidad para la selección de los puntos de muestreo más cercanos o incluidos en las masas de agua objetivo.
- Identificación de estaciones y puntos de muestreo que espacialmente mejor se relacionan con las masas de agua.

Metodología

La metodología desarrollada utiliza técnicas de análisis vectorial propias de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). En el análisis se ha utilizado el SIG del libre acceso QGIS (versión 3.10.14), aunque cualquier SIG presenta herramientas suficientes para este tipo de estudios.

Previo al análisis, se deben construir las digitales con la localización de los elementos constitutivos del análisis espacial: redes de puntos de muestreo de calidad del agua, sistema de estaciones meteorológicas y masas de agua.

A partir de estas capas iniciales, la determinación de los puntos de muestreo (tanto de calidad del agua como estaciones meteorológicas) de interés se realiza con técnicas de análisis espacial. Todas las capas del SIG se construyen en formato vectorial, bajo las mismas características geoespaciales: ETRS 89, zona 29-Norte para el embalse de As Conchas y ETRS 89, zona 30 Norte para la Albufera de Valencia.

Debido a que la localización de las estaciones meteorológicas es distinta a la ubicación de los puntos de muestreo de calidad del agua es distinta, se deben realizar los análisis contextuales para la localización de las estaciones meteorológicas y los puntos de muestreo de agua de manera distinta.

Estaciones meteorológicas

Las capas iniciales son dos, la que contiene la entidad geométrica poligonal de la masa de agua (el embalse de las Conchas y la Albufera de Valencia en nuestro caso) y las estaciones meteorológicas identificadas en su entorno (capa con geometría de puntos). La secuencia de trabajo requiere (1) la obtención del centroide de la masa de agua analizada, creándose una capa vectorial que incluye ese único punto; (2) el cálculo de la distancia desde los puntos de las estaciones meteorológicas al centroide y al borde de la masa de agua respectivamente y (3) la media de las distancias (centroide y borde de la masa de agua) obtenidas en el paso anterior.

El procedimiento de trabajo y las herramientas utilizadas con el SIG QGIS es el siguiente:

1. Obtención de capa con el centroide de la masa de agua
Función: cálculo de las coordenadas x e y de localización de centroide.
Herramienta utilizada en QGIS:
 - Caja de Herramientas de Procesos
 - Geometría Vectorial
 - Centroides
 - ✓ Capa resultante: **Centroide masa agua.shp**

2. Obtención de distancias desde estaciones meteorológicas a borde y centroide de la masa de agua.
Función: Creación de campos de distancias en la base de datos asociada a la capa vectorial con las estaciones meteorológicas cercanas a la masa de agua.

Herramienta utilizada en QGIS:
Parte 1: Distancia lineal de las estaciones al centroide de la masa de agua
 - Caja de Herramientas de Procesos
 - Análisis de vector
 - Distancia al eje más próximo (línea a eje)
 - ✓ Capa resultante: **Distancia temporal 1.shp**
Parte 2: Cálculo de la distancia desde el borde de la masa de agua hasta su centroide
 - Vectorial-Barra superior horizontal de tareas
 - Herramientas de geoprocreso
 - Intersección
 - ✓ Capa resultante: **Distancias masa agua.shp**
Parte 3: Cálculo de la distancia al borde de la masa de agua y distancia media entre la distancia al centroide y la distancia al borde de la masa de agua
 - Gestión de la base de datos asociada a capa Distancias masa agua.shp
 - Creación de tres campos_ DIST_SEGM, DIST_BORDE y DIST_MEDIA (figura 2).
 - Calculadora de campo:
 - Cálculo de las distancias para DIST_SEGM (distancia del segmento interno desde el el borde al centroide de la masa de agua.
 - Cálculo de la distancia para DIST_BORDE: diferencia entre la distancia de la estación meteorológica al centroide ((HubDist) de la masa de agua y del segmento correspondiente calculado en DIST_BORDE.

Cálculo de de la distancia para DIST_MEDIA: promedio de la suma de las distancias DIST_BORDE y la distancia al centroide (HubDist)

- ✓ Capa resultante: no se crea capa nueva. Se gestiona la base de datos de la capa **Distancias masa agua.shp**

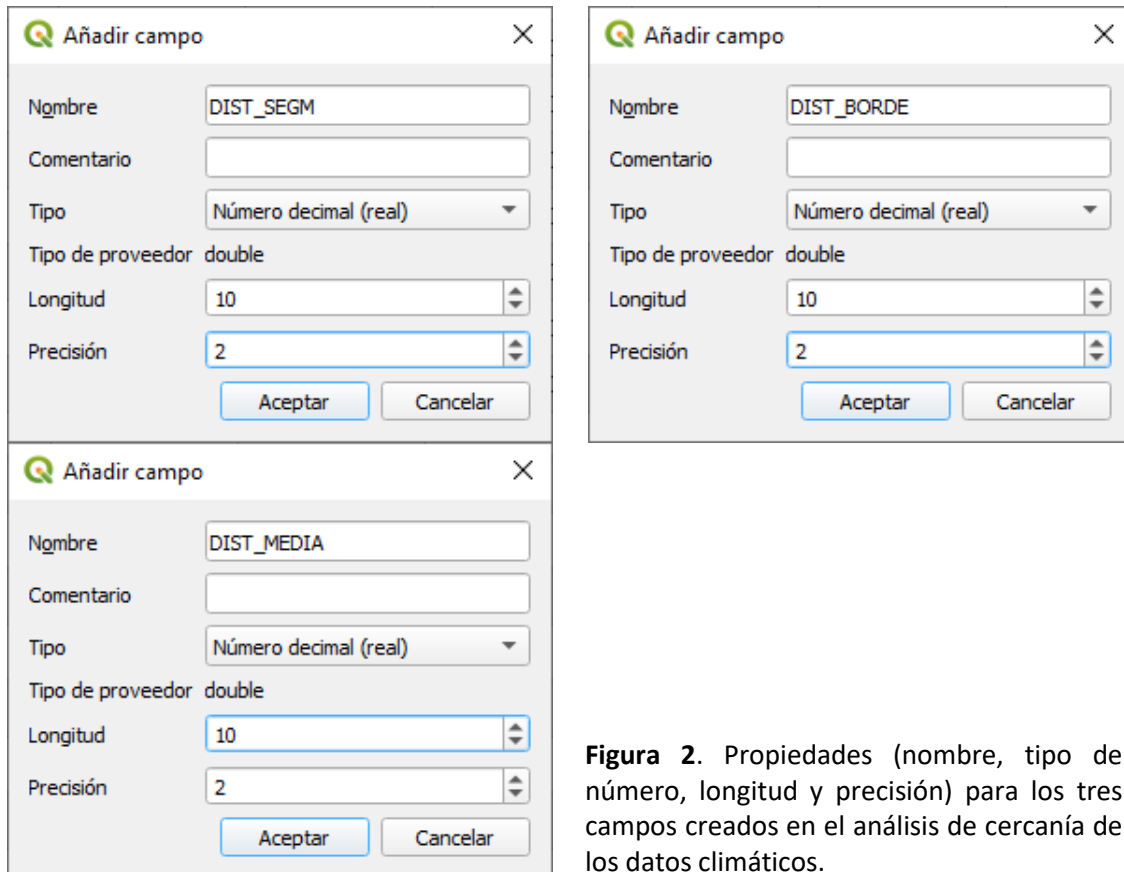


Figura 2. Propiedades (nombre, tipo de número, longitud y precisión) para los tres campos creados en el análisis de cercanía de los datos climáticos.

Identificación de puntos de medición de calidad de agua

Al igual que con las estaciones meteorológicas, la metodología empleada en la identificación de los puntos de calidad de agua se ha basado en el análisis espacial de los datos geo-referenciados vectoriales empleando el SIG QGIS. La secuencia de trabajo se divide en las siguientes dos fases:

1. Selección de puntos de medición dentro de la masa de agua
 - Vectorial-Barra superior horizontal de tareas
 - Herramientas de investigación
 - Seleccionar por localización
 - ✓ Se crea una selección de los puntos que se encuentran dentro de la masa de agua
2. Creación de capa vectorial con los puntos de calidad de agua identificados
 - Gestión de la capa vectorial con los puntos identificados (botón derecho del ratón)
 - Exportar
 - Guardar objetos (seleccionados) como...
 - ✓ Capa resultante: **Puntos calidad agua masa agua.shp**

2.3. Fase 3. Análisis de consistencia de las series de datos

Objetivos

- Identificar las características de las mediciones de las series de calidad del agua y climáticas, atendiendo a las características propias de las mediciones de cada tipo de datos.
- Establecer un procedimiento analítico para los datos climáticos en el que se determinen los días sin datos (falta de mediciones).
- Establecer un procedimiento sintético de análisis que determine la utilidad de las series con datos de calidad del agua para análisis temporales largos.

Metodología

Para las estaciones objetivo determinadas en la fase 2 se realiza un análisis de consistencia de las series de datos, teniendo como referencia un marco temporal de 21 años, desde el 1 de enero del 2000 hasta el 31 de diciembre de 2021. La técnica empleada consiste, partir de hojas de cálculo, en la creación de matrices sintéticas (tablas dinámicas) y de índices de integridad que relacionan el número de años con mediciones, los vacíos de información y el máximo número de mediciones que habría si se hubiese medido en todos los días de las series temporal de referencia (21 años).

Para el tratamiento de las hojas de cálculo, se ha utilizado el programa Excel (versión 2016), aunque los datos podrían también ser tratados de manera similar con programas de libre acceso como Open Office o Libre Office. Debido a la distinta naturaleza de las mediciones de los datos climáticos y de los de calidad del agua, aun utilizando la misma técnica de creación de tablas dinámicas, el procedimiento para la organización en ellas difiere, por lo que se detalla de manera diferencial sus distintos contenidos.

Estaciones meteorológicas

La tabla dinámica diseñada para los datos climáticos (tabla 1) se organiza en una matriz en la que las filas representan los años con mediciones de una estación meteorológica y las columnas los meses del año. Las celdas de intersección entre ambas recogen el número de días con mediciones.

Tabla 1. Estructura de la tabla dinámica diseñada para el análisis de consistencia de las series temporales con datos climáticos.

	Columnas: meses, de enero a diciembre											
Filas: años de la serie climática de referencia en los que se recogen medidas												
	Datos faltantes: Número de días por mes sin mediciones											

Para establecer un valor sintético que representa a la serie histórica analizada se ha creado el Índice de integridad de la serie que consiste: Días de la serie de referencia/Número de días con datos de la serie analizada.

Puntos de medición de calidad del agua

La tabla dinámica diseñada (tabla 2) representa en las filas los años de la serie en los que se ha recogido datos y en las columnas los doce meses del año. Las celdas registran el recuento de mediciones recogido en un punto de muestreo por mes.

Tabla 2. Estructura de la tabla dinámica diseñada para el análisis de consistencia de las series temporales con datos de calidad del agua.

	Columnas: meses, de enero a diciembre											
Filas: Años de la serie de calidad del agua en los que se recogen medidas												
	Valores: número de mediciones de cualquier parámetro de calidad del agua por mes y año											

2.4. Fase 4. Consistencia de los parámetros de las series de interés

El último análisis que se realiza, fase 4, se centra en la información contenida en las series temporales de las estaciones seleccionadas en las fases 2 y 3. En este caso, también por medio de uso de hojas dinámicas, se analiza la existencia de parámetros relevantes que pueden explicar la probabilidad de aparición de cianobacterias. Además, se desarrollan indicadores sobre la consistencia de las mediciones de estos parámetros a lo largo del tiempo y de la posibilidad de que estas mediciones, si han sido realizadas constantemente, puedan establecer tendencias temporales fiables.

Objetivos

- Identificar las características de las mediciones relacionadas con los parámetros contenidos en las series temporales objetivo.
- Establecer un procedimiento analítico para los datos climáticos en el que se determinen la utilidad de los parámetros de interés.
- Establecer un procedimiento analítico para los datos de calidad de agua en el que se determinen la utilidad de los parámetros contenidos en las series temporales de los puntos de nuestro objetivo.

Metodología

Datos climáticos

La estructura de la tabla dinámica relacionada con los datos climáticos organiza, de manera similar a las tablas anteriores la información en filas (años de la serie climática) y columnas (parámetros de interés), recogiendo en las celdas de intersección entre ambas el número de días de un año en el que se han hecho mediciones para un parámetro concreto (tabla 3).

Tabla 3. Estructura de la tabla dinámica diseñada para el análisis de mediciones de parámetros climáticos.

	Columnas: Parámetros climáticos de interés											
Filas: años de la serie climática de referencia en los que se recogen medidas												
	Valores: número de días que por año en los que se han realizado mediciones en cada uno de los parámetros de interés											

Datos de calidad del agua

La tabla dinámica (tabla 4) diseñada para analizar las características de la información de calidad del agua contenida en las series temporales objetivo combina por filas (parámetros) y columnas (años de la serie) el número de veces que en un año se ha medido un parámetro concreto.

Asimismo, a la tabla se le han añadido tres indicadores que sintetizan los valores totales de mediciones de un parámetro (S1), el número de años de con mediciones que presenta el parámetro (S2) y la media de mediciones por año del mismo parámetro (S3) = S1/S2.

Tabla 4. Estructura de la tabla dinámica diseñada para el análisis de mediciones de parámetros de calidad del agua.

	Columnas										
	Años de la serie con mediciones de calidad del agua										Indicadores (S1, S2, S3)
Filas: Parámetros de calidad del agua											S1: Total de mediciones de un parámetro S2: Años con mediciones S3: Media de mediciones (=S1/S2)
	Número de veces en un año que ha sido medido el parámetro de calidad del agua										

2.5. Fase 5. Análisis de las series temporales y evaluación de la vulnerabilidad de los entornos

Objetivos

- Establecer patrones y tendencias temporales de las series climáticas y de clorofila en ambas masas de agua.
- Establecer un procedimiento analítico común para los parámetros utilizados y aplicables en las dos masas de agua.
- Establecer criterios para el análisis de vulnerabilidad de las masas de agua.

Metodología

Datos climáticos

El análisis se basa en la exploración estadística con hojas de cálculo con representación gráfica de los datos climatológicos de las estaciones de referencia para las masas de agua de la Albufera de Valencia y el embalse de las Conchas.

Datos de calidad del agua

Se ha realizado un análisis estadístico con los datos de los parámetros de clorofila A, los nitratos, los fosfatos, el oxígeno disuelto, el pH y la conductividad eléctrica. El análisis estadístico ha consistido en la representación gráfica de las series temporales de los parámetros objetivo, la elaboración de gráficos anuales de síntesis con las medias, medianas, valores máximos, mínimos y atípicos de las concentraciones de clorofila A y el Análisis estadístico univariante mediante el test de Kruskal-Wallis sobre los datos de clorofila A. Finalmente, se ha realizado un análisis descriptivo de vulnerabilidad por medio de la reclasificación gráfica de los valores de clorofila A según los umbrales de alerta recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS): nivel de vigilancia (niveles de clorofila

A iguales y superiores a 1 µg/L), alerta 1 y alerta 2 (cuando se alcanzan 10 y 50 µg/L de clorofila A, respectivamente).

3. Aplicación

3.1. Fase 1. Identificación de organismos productores de información relacionada con la presencia potencial de afloramientos de cianobacterias

La tabla 5 muestra los organismos productores de información sobre calidad del agua y datos climáticos. La página web de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) tiene un sistema interactivo de datos de calidad del agua en el que, eligiendo el punto de calidad del agua, puede descargar directamente su serie histórica con los valores de los distintos parámetros medidos. También dispone de cartografías digitales vectoriales con la localización de los puntos de muestreo y un archivo completo con todas las mediciones realizadas en todos los puntos de muestreo desde principios de los años 90 del siglo pasado. Sin embargo, la Confederación Hidrográfica Miño-Sil presenta un sistema de consulta con la localización de los puntos de muestreo de calidad del agua y una ficha interactiva para solicitar los datos de interés, sin posibilidad de descargarlos directamente como ocurre con la CHJ.

Tanto El instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, para la Albufera de Valencia, como Meteo Galicia (Consejería de Medio Ambiente, Territorio y Vivienda de la Xunta de Galicia), para el embalse de As Conchas, tienen en sus páginas WEB una sección en la que se muestra la red de estaciones meteorológicas propias. La información relativa a cada una de ellas, incluidos los datos de las series históricas de los distintos parámetros medido, permitiendo la descarga directa de los datos. La Agenda Estatal de Meteorología también tiene su propia red de estaciones, debiendo realizarse una petición de los datos, pues para algunas de ellas no pueden descargarse directamente desde la página WEB.

Tabla 5. Organismos productores de información climática y de sobre calidad del agua de interés para el análisis histórico de factores que inciden en la presencia de cianobacterias en aguas continentales.

Datos	Masa de agua	Organismo	URL
Calidad del agua	Albufera de Valencia	Confederación Hidrográfica del Júcar	https://www.chj.es/es-es/Paginas/Home.aspx
	Embalse de as Conchas	Confederación Hidrográfica del Miño-Sil	https://www.chminosil.es/es/
Climáticos	Albufera de Valencia	Meteo Galicia (Xunta de Galicia)	https://www.meteogalicia.gal/
	Embalse de as Conchas	Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA)	http://riegos.ivia.es/
	Ambas masas	Agencia Estatal de Meteorología	http://www.aemet.es/es/portada

3.2. Fase 2. identificación de estaciones de referencia (puntos de muestreo)

Por lo que respecta a los datos climáticos, debe tenerse en cuenta la cercanía de la estación a la masa de agua objeto de estudio. La proximidad es un factor a considerar si se buscan posibles relaciones entre las características climáticas y las propiedades del agua analizadas. Es conveniente hacer un análisis espacial para seleccionar la estación (o estaciones) más próxima al cuerpo de agua objetivo. La proximidad se establece como la distancia (euclidiana) en línea recta más corta entre dos puntos.

Para la masa de agua se ha tomado como referencias de distancia el borde y, también el centroide. Debe tenerse en cuenta que no siempre una estación meteorológica presentará la máxima cercanía

en las dos distancias, por lo que se ha creado una tercera, la media de ambas distancias (al borde y al centroide), considerándose en ese caso que la estación más cercana es la que presenta un valor promedio menor.

Las tablas 6 y 7 muestran los resultados obtenidos en el cálculo de distancias de las estaciones meteorológicas cercanas a la Albufera de Valencia y al embalse de As Conchas, respectivamente. Para la Albufera de Valencia se ha encontrado una estación perteneciente a la red de mediciones meteorológicas del IVIA en la que coinciden las menores distancias a borde y a centroide, también la media. En consecuencia, Benifaió es la estación objetivo que se utilizará en los análisis propuestos en las Fases 3 y 4 de la metodología.

En As Conchas, la estación de Calvos de Randín presenta la distancia más corta al borde de la masa de agua, mientras que la de Xurés es la más cercana al centroide (tabla 7). Por consiguiente, se hace necesario recurrir a la tercera distancia, Promedio, resultando como estación objetivo la de Calvos de Randín. Ambas pertenecen a la red autonómico, Meteo Galicia, de mediciones climáticas.

Tabla 6. Distancias de las estaciones meteorológicas a la masa de agua de la Albufera de Valencia.

identificadores		Localización		Distancias		
Estación	Organismo	UTM X	UTM Y	Borde	Centroide	Promedio
Algemesí	IVIA	721413	4343930	11.69	14.88	13.28
Benifaió	IVIA	718925	4350990	7.31	11.02	9.16
Bétera	IVIA	717423	4386260	27.99	30.83	29.41
Carlet CE Coop	IVIA	711835	4344773	16.70	20.41	18.56
Manises	IVIA	715439	4373565	17.60	20.54	19.07
Moncada IVIA	IVIA	723368	4385233	25.45	28.32	26.89
Picassent	IVIA	715588	4359990	9.61	12.67	11.14
Polinyà de Xúquer	IVIA	725018	4341715	12.93	15.85	14.39
Tavernes de Valldigna	IVIA	738862	4330980	25.68	28.48	27.08
Valencia-Aeropuerto	AEMET	717181	4373644	16.71	19.59	18.15
Polinyà de Xúquer	AEMET	726991	4340566	13.94	16.75	15.34
Valencia-Viveros	AEMET	726514	4373418	13.33	16.19	14.76
Valores mínimos				7.31	11.02	9.16

Tabla 7. Distancias de las estaciones meteorológicas a la masa de agua del embalse de As Conchas.

Identificadores		Localización		Distancias		
Estación	Organismo	UTM X	UTM Y	Borde	Centroide	Promedio
Pontevedra	AEMET	38049	4713748	72.57	73.73	73.15
Lobios	Meteo Galicia	77580	4650663	6.80	11.98	9.39
Entrimo	Meteo Galicia	76682	4656248	5.90	10.28	8.09
Xurés	Meteo Galicia	87572	4651014	5.97	7.42	6.70
Calvos de Randín	Meteo Galicia	94240	4657077	4.70	7.61	6.16
Xinzo	Meteo Galicia	109845	4671849	19.82	26.74	23.28
Gandarela	Meteo Galicia	89644	4680971	18.54	22.77	20.66
Cequeli	Meteo Galicia	64971	4678098	28.03	29.37	28.70
Valores mínimos				4.70	7.42	6.16

Calidad del agua

El análisis SIG realizado se aplicó en la Albufera de Valencia. Se han utilizado técnicas de superposición de capas vectoriales, por medio de las cuales se discriminan los puntos de muestreo que quedan

dentro de la masa de agua, se han identificado seis puntos susceptibles de ser analizados en la fase 3 (figura 3). Estos puntos de medición son JUI607, JUI625, JUI626, JUI627, JUI628 y JUI630.

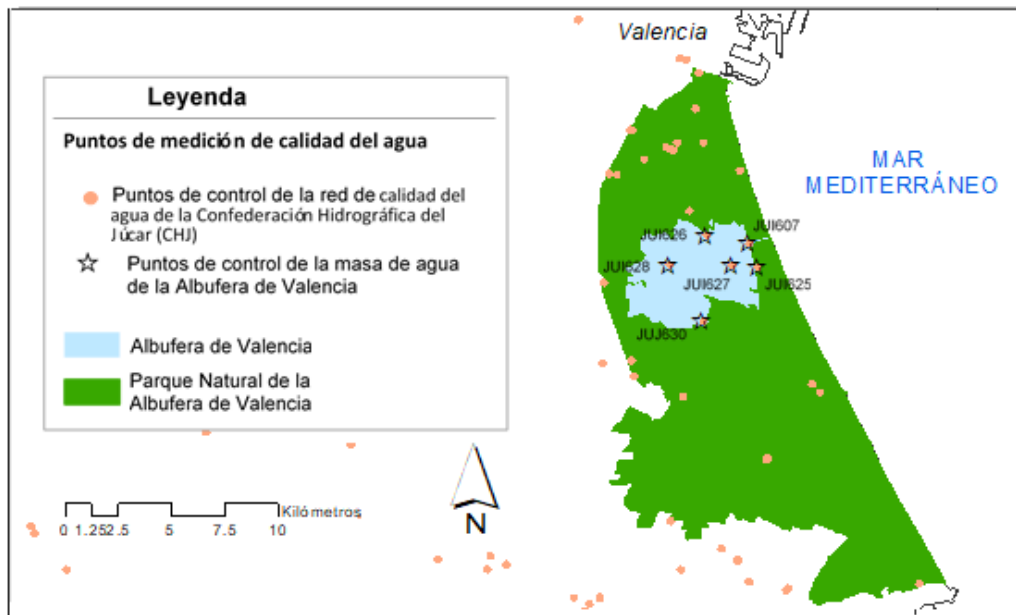


Figura 3. Puntos de control de la red de calidad de agua dentro de la Albufera de Valencia pertenecientes a la Confederación Hidrográfica del Júcar.

En el embalse de As Conchas, la Confederación Hidrográfica Miño-Sil tiene un punto de medición para la mayoría de parámetros de calidad del agua, y varios puntos de muestreo para la cuantificación de clorofilas (figura 5). El punto MS087FQ, donde se recogen la mayoría de parámetros, se localiza cerca de la presa del embalse. Los puntos de medición de clorofilas se dividen en los medidos en superficie y los medidos en perfiles de profundidad. En superficie, los puntos de muestreo son la orilla derecha de la presa y las playas fluviales de O Corgo y Portoquintela, mientras que las medidas de perfil en profundidad se realizan en la zona central de la presa y en la zona central entre ambas playas.



Figura 5. Puntos de control de la red de calidad de agua de la Confederación Hidrográfica Miño-Sil en la masa de agua del embalse de As Conchas.

3.3. Fase 3. Análisis de consistencia de las series de datos

El análisis de integridad o consistencia de una serie temporal se refiere a la existencia de mediciones continuadas a lo largo del tiempo. Éstas difieren según los parámetros ambientales requeridos y el tipo de estrategia seguida en la recogida de datos (manual, automática, etc.). En el caso de las variables climáticas, gran parte de ellas están ya medidas por medio de redes automáticas ofreciendo, al menos, mediciones diarias. Sin embargo, los datos de calidad de agua suelen estar recogidos en distintas campañas de campo realizadas a lo largo del año. Si bien el análisis de consistencia tiene para ambos tipos de datos determinar que las mediciones están recogidas en el tiempo y periodicidad que muestra la serie de datos, la estrategia de análisis difiere según el tipo de variables analizadas. Por tanto, en esta sección se realizará por separado el análisis de consistencia de los datos climáticos del de los datos de calidad del agua.

Datos climáticos

i. Albufera de Valencia. Estación de Benifaió del IVIA

La estación de Benifaió tiene registradas mediciones desde finales de 2019, unos meses antes del inicio de la serie de referencia (Tabla 8). Por tanto, la integridad de la serie, en lo que a la recogida de datos diarios se refiere, sería completa si el número de días con mediciones fuera igual al de días de la serie de referencia, 7671.

Tabla 8. Análisis de integridad de la serie temporal climática (Estación de Benifaió-IVIA).										
a. Características de la serie										
Fechas de referencia		Inicio		01/01/2000						
		Fin		31/12/2020						
Días de la serie de referencia				7671						
Fechas de la serie analizada (Benifaió)		Inicio		22/10/1999						
		Fin		Activa						
b. Días faltantes										
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	Jun	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
2002					7	9	1		4	21
2003		7		4					6	17
2004	12	3	31	5				7		58
2007				2						2
		Días consecutivos dentro de un mes								
		Días consecutivos distribuidos en dos meses								
		Días consecutivos distribuidos en tres o más meses								
c. Índice de integridad de la serie										
Número de días con datos					7573					
Número de días sin datos					98					
Índice de integridad de la serie*					0,987					
					*Días de la serie de referencia/Número de días con datos de la serie analizada					

Sin embargo, se han identificado días consecutivos sin datos (Tabla 8, b. Días faltantes), hasta un total de 98 días. El máximo número de días consecutivo de días sin mediciones es de 58 (repartido en tres meses). Aunque la serie presenta falta de mediciones su índice de integridad es cercano a 1 (0,987), lo que indica que, si los datos tuvieran que compararse con parámetros de calidad de agua, se alcanzaría una gran coincidencia en los días de medición entre ambos tipos de parámetros, pudiéndose hacer un análisis en los 21 años establecidos en la serie de referencia.

ii. Embalse de As Conchas. Estación de Calvos Randín de Meteo Galicia

La serie climática de la Calvos de Randín (tabla 9) tiene datos recogidos diariamente desde el 26 de mayo de 2011, 3508 días, menos de la mitad de la serie de referencia (7671 días). Sin embargo, a partir de esa primera medición, no aparece ningún día en el que no se haya hecho alguna medición, por lo que, independientemente del índice de integridad de la serie (0,46), los datos serían idóneos para ser correlacionados con parámetros de calidad del agua entre el 26 de mayo de 2011 y el último día de la serie de referencia, el 31 de diciembre de 2020.

Tabla 9. Análisis de integridad de la serie temporal climática (Estación de Calvos de Randín-Meteo Galicia)													
a. Características de la serie													
Fechas de referencia		Inicio				01/01/2000							
		Fin				31/12/2020							
Días de la serie de referencia						7671							
Fechas de la serie analizada (Calvos)		Inicio				26/05/2011							
		Fin				Activa							
Año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Total
2000	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
2001	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2002	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2003	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2004	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
2005	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2006	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2007	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2008	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
2009	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2010	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2011	31	28	31	30	25								145
				Días consecutivos en meses consecutivos									
b. Índice de integridad de la serie													
Número de días con datos						3508							
Número de días son datos						4163							
Índice de integridad de la serie*						0,46							
			*Días de la serie de referencia/Número de días con datos de la serie analizada										

Datos de calidad del agua

En el caso de los datos de calidad del agua, la propuesta es más sencilla. Se realiza una exploración por medio de la creación de matrices numéricas sintéticas en la que se identifican los años y meses que recogen mediciones, pudiendo ser el número total la suma de veces que se miden muestras en un mes y los parámetros medidos. Se considera que un punto de medición de agua consistente es el que tuviera recogida información todos los meses de la serie temporal de referencia (21 años), siendo menos apto para un análisis conjunto el que tuviera menos mediciones mensuales y menos años con registros.

i. Albufera de Valencia. Puntos de medición JUI627 y JUC630

De los seis puntos de medición de calidad del agua encontrados en la Albufera de Valencia, cuatro de ellos, JUI607, JUI625, JUI625 y JUI628, presentan mediciones irregulares, poco consistentes, lo que hacen que los datos sean poco útiles para hacer un estudio temporal consistentes.

Son los datos de los puntos JUI627 y JUI630 los que tienen una mejor representatividad mensual. En estos dos puntos los registros, aunque se inician en octubre de 2008, continúan hasta diciembre de 2020. El punto JUI627 (tabla 10) presenta mayor número de mediciones totales anuales que el JUI630 (tabla 11). En ambos los meses con más registros y que se repiten más sistemáticamente a lo largo de los años de la serie son mayo y junio.

Tabla 10. Años y meses que registran mediciones de calidad del agua en el punto JUI627 de la Albufera de Valencia.

Año	Número de mediciones mensuales												Total
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	
2008										28			28
2009						28				28			56
2010						28		45					73
2011							69						69
2012					69		59						128
2013					71		33						104
2014					55		56						111
2015					25						167		192
2016			98		29		20			3			150
2017					25		20						45
2018										21	5	5	31
2019	5	25	5	5	62		50	25	5	5	5	5	197
2020	5	20	5	30	55	69	52	22	5	5	5	5	278

Tabla 11. Años y meses que registran mediciones de calidad del agua en el punto JUI630 de la Albufera de Valencia.

Año	Número de mediciones mensuales												Total
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	
2008										28			28
2009						21				21			42
2010						21							21
2011							54						54
2012					50		55						105
2013					63		26						89
2014					49		56						105
2015					25			5	5	5	145	5	190
2016	5		98	5	29	5	20	5	5	5	5		182
2017					25		15						40
2018										21			21
2019		20			58		39	20					137
2020		15		20	40	61	45	17					198

ii. Embalse de As Conchas. Puntos de medición Embalse de Las Conchas (Río Limia)

En As Conchas, puede considerarse que el punto de muestreo de calidad del agua MS087FQ (tabla 12), y particularmente los puntos de muestreo de clorofilas (tabla 13), son relativamente consistentes desde el inicio de las mediciones. Durante todos los años se toman mediciones durante la época estival, a excepción del año 2017, donde se recogió el menor número de muestras. En particular, los meses de junio, julio y agosto son los que presentan mayor recurrencia en las mediciones y solo durante 2017 no se recogieron muestras durante estos meses para la cuantificación de clorofilas.

Tabla 12. Años y meses que registran mediciones de calidad del agua en el punto de medición MS087FQ en el embalse de As Conchas.

Año	Número de mediciones mensuales												Total
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	
2010	6			7		7	6	7		7			40
2011		7		12	5	18		10	11	13	11	13	100
2012	12	18	6	13	11	14	22	19	16	13	6	18	168
2013	11	13	6	23	6	23	21	18	21	13	6	12	173
2014				5	5	5	5	3				5	28
2015					6	6	5		6	6	6		35
2016	12	6	6	6	11	6	11	5	11	6			80
2017			5			5	5				5		20
2018	6	6	6	11	6	16	6	5	11	13	6	6	98
2019	6	6		12	11	6	23	10	6	11	7		98
2020				7			13		7		13	7	47

Tabla 13. Años y meses que registran mediciones de calidad del agua en todos los puntos de medición de clorofilas en el embalse de As Conchas.

Año	Número de mediciones mensuales												Total	
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic		
2011										3	18	22	13	56
2012	7	13	3	3	25	25	25	21	34	15	3			174
2013	3	19	9	14	8	22	38	15	28	11	3	12		182
2014	3	3	6	12	18	19	22	16	9	3	3	10		124
2015	3	3	3	6	6	9	16	12	3	6	3	3		73
2016	3	3	3	6	16	12	20	8	9	6	3	3		92
2017										6	12	3		21
2018	3	3	6	16	6	26	19	19	15	6	3	3		125
2019	5	3	6	15	15	6	30	16	9	14	3	3		125
2020	3	11	3		6	9	6	9	3	9	3	3		65

3.4. Fase 4. Consistencia de los parámetros de las series de datos

El análisis se centra en la información contenida en las series temporales de las estaciones seleccionadas en las fases anteriores. En este caso, también por medio de uso de hojas de cálculo, se analiza la existencia de parámetros relevantes que pueden explicar la probabilidad de aparición de cianobacterias. Además, se desarrollan indicadores sobre la consistencia de las mediciones de estos parámetros a lo largo del tiempo y de la posibilidad de que estas mediciones presenten tendencias temporales útiles para un posterior análisis de los parámetros.

Datos climáticos

El análisis de idoneidad de los parámetros climáticos se realiza teniendo en cuenta la duración temporal de las estaciones de referencia para las masas de agua. La consistencia de las mediciones de los parámetros se refiere a la coincidencia de sus mediciones en todos los días de la serie. Para las dos estaciones se han seleccionado parámetros climáticos similares relacionados con precipitación, temperatura máxima, velocidad y dirección del viento y radicación solar.

i. Albufera de Valencia. Estación de Benifaió del IVIA

La estación de Benifaió presenta gran consistencia y homogeneidad en los datos recogidos (Tabla 14). La serie presenta muy pocas carencias de datos por parámetro, siendo coincidentes todos ellos a lo largo de los 21 años analizados.

Tabla 14. Síntesis de mediciones de parámetros climáticos por año en la estación de Benifaió-Albufera de Valencia.

Año	Precipitación	Temperatura media	Velocidad media del viento	Dirección media del viento	Radiación
2000	366	366	366	366	366
2001	365	365	365	365	365
2002	344	344	344	344	344
2003	348	348	348	348	348
2004	308	308	308	308	308
2005	365	365	365	365	365
2006	365	365	365	365	365
2007	363	363	363	363	363
2008	366	366	366	366	366
2009	365	365	365	365	365
2010	365	365	365	365	365
2011	365	365	365	365	365
2012	366	366	366	366	366
2013	365	365	365	365	365
2014	365	365	365	365	365
2015	365	365	365	365	365
2016	366	366	366	366	366
2017	365	365	365	365	365
2018	365	365	365	365	365
2019	365	365	365	365	365
2020	366	366	366	366	366
Totales	7573	7573	7573	7573	7573

ii. Embalse de As Conchas. Estación de Calvos Randín de Meteo Galicia

La estación de Calvos de Randín es algo más inconsistente (tabla 15). A excepción de los dos primeros años, 2011 y 2012, en los que no hay medidas de Irradiación solar, el resto ya tienen las mediciones de los cinco parámetros analizados. Sin embargo, en alguno de ellos, faltan mediciones algunos días a lo largo del año. Lo que no invalida para que los cinco parámetros pudieran ser utilizados conjuntamente para ser comparados con series de calidad del agua.

Tabla 15. Síntesis de mediciones de parámetros climáticos por año en la estación de Calvos de Randín-Embalse de As Conchas.

Año	Precipitación	Temperatura media	Velocidad del viento	Dirección del viento predominante	Irradiación global diaria
2011	220	220	220	209	
2012	366	366	366	362	366
2013	365	365	364	363	208
2014	365	365	365	363	365
2015	365	365	365	364	365
2016	365	366	364	364	359
2017	365	365	362	363	365
2018	365	365	361	361	365
2019	365	365	365	365	365
2020	366	366	365	365	366
Total	3507	3508	3497	3479	3124

Datos de calidad del agua

Para el análisis de la consistencia en las mediciones de los parámetros de calidad del agua recogidos en las series temporales se han seleccionado aquellos que se consideran que tienen una mayor relación con la proliferación de cianobacterias. El número de parámetros difiere entre los distintos puntos de control; sin embargo, cualquiera de ellos ofrece una cantidad suficiente y representativa. Al igual que con el análisis de los parámetros climáticos, el relacionado con los parámetros de calidad de agua también se basa en el tratamiento de todos los valores de la serie temporal recogidos en hojas de cálculo. El proceso seguido ha sido su agrupación por años con un indicador con el total de veces que el parámetro ha sido medido en cada uno de ellos. Además, se han calculado tres indicadores sintéticos que son el número total de mediciones de un parámetro a lo largo de la serie temporal (S1), el número de años que ese parámetro ha sido medido (S2) y la ratio de medición del parámetro a lo largo del tiempo de duración de la serie (S3).

i. Albufera de Valencia. Puntos de medición JUI627 y JUC630.

Para este análisis, se utilizan los dos puntos que presentan datos todos los meses del año (tablas 10 y 11), JUI627 y JUC630. En el primero, JUI627 (tabla 16), de los 19 parámetros seleccionados, 8 tienen todos los años registros (Indicador S2 igual a 13). Al tener al menos una medición por año, podría realizarse un seguimiento mínimo temporal anual del comportamiento de los parámetros fosfatos, fósforo total, nitratos, clorofila A, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH y temperatura del agua. El análisis histórico podría ampliarse a estacional para los cinco últimos parámetros (clorofila A, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH y temperatura del agua), como indica el indicador S3.

Tabla 16. Síntesis de mediciones de parámetros de calidad del agua por año en punto JUI627- Albufera de Valencia.

Parámetros	Años													Indicadores		
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	S1	S2	S3
Abundancia de fitoplancton			31	32	55	38	52	104	69			56	48	485	9	53.9
Biovolumen total de fitoplancton							2	2	1			2	2	9	5	1.8
CLOROFILA A	4	8	5	5	10	9	2	15	14	8	4	18	29	131	13	10.1
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	3	6	4	4	8	7	8	15	14	8	5	23	37	142	13	10.9
Densidad de Algas Verde-Azules	3	6	3											12	3	4.0
FOSFATOS	1	2	2	1	2	2	2	3	2	1	1	4	8	31	13	2.4
FOSFORO TOTAL	1	2	2	2	3	3	3	3	4	2	1	4	8	38	13	2.9
NITRATOS	1	2	2	1	2	2	2	3	3	1	1	4	8	32	13	2.5
NITRITOS	1	2	2	1	2	2	2	1	1	1				15	10	1.5
NITROGENO KJELDAHL	1	2	2	1	2	2	2	3	2	1				18	10	1.8
NITROGENO TOTAL				1	2	2	2	1	1	1	1	4	8	23	10	2.3
Nº de taxones Tóxicos (ud)				2	4	2	4							12	4	3.0
OXIGENO DISUELTO	3	6	4	4	8	7	8	12	11	6	5	23	38	135	13	10.4
PH	3	6	3	4	8	7	8	15	14	8	5	23	37	141	13	10.8
POTENCIAL REDOX			1											1	1	1.0
SULFATOS			1	1	2	2	2							8	5	1.6
TEMPERATURA AGUA	3	6	4	4	8	7	8	12	11	6	5	23	38	135	13	10.4
Temperatura del aire			1			2		3	3	2	3	11	16	41	8	5.1
TURBIDEZ	3	6	4	4	8	7								32	6	5.3

S1: Total de mediciones de un parámetro; S2: Años con mediciones; S3: Media de mediciones (=S1/S2)

El punto JUC630 (tabla 17) muestra características similares en la medición de los parámetros. Coincide en casi todos parámetros que se miden en la serie histórica de 13 años, a excepción del potencial Redox, aunque este solo aparece en JUI627 una vez en 2010. Coincide con el punto JUI627 en los ocho

parámetros a los que podría realizarse un seguimiento anual en la serie histórica y, también, en los cinco con mayor número de mediciones por año (clorofila A, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH y temperatura del agua), por lo que podría explorarse su potencial para un análisis estacional de la serie histórica.

Tabla 17. Síntesis de mediciones de parámetros de calidad del agua por año en punto JUC630-Albufera de Valencia.

Parámetros	Años													Indicadores		
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	S1	S2	S3
Abundancia de fitoplancton				23	44	30	54	92	74			51	47	415	8	51.9
Biovolumen total de fitoplancton							2	2	1			2	2	9	5	1.8
CLOROFILA A	4	6	3	4	8	8	2	12	10	7	4	14	22	104	13	8.0
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	3	4	2	3	6	6	6	17	20	7	3	12	22	111	13	8.5
Densidad de Algas Verde-Azules	3	4	2											9	3	3.0
FOSFATOS	1	2	1	1	2	2	2	3	2	1	1	4	8	30	13	2.3
FOSFORO TOTAL	1	2	1	2	3	3	3	3	3	2	1	4	8	36	13	2.8
NITRATOS	1	2	1	1	2	2	2	3	2	1	1	4	8	30	13	2.3
NITRITOS	1	2	1	1	2	2	2	1	1	1				14	10	1.4
NITROGENO KJELDAHL	1	2	1	1	2	2	2	3	2	1				17	10	1.7
NITROGENO TOTAL				1	2	2	2	1	1	1	1	4	8	23	10	2.3
Nº de taxones Tóxicos (ud)				2	4	2	4							12	4	3.0
OXIGENO DISUELTO	3	4	2	3	6	6	6	14	17	5	3	12	22	103	13	7.9
PH	3	4	2	3	6	6	6	17	20	7	3	12	22	111	13	8.5
SULFATOS				1	2	2	2							7	4	1.8
TEMPERATURA AGUA	3	4	2	3	6	6	6	14	17	5	3	12	22	103	13	7.9
Temperatura del aire						1		8	13	2	1	4	8	37	7	5.3
TURBIDEZ	3	4	2	3	6	6								24	6	4.0

S1: Total de mediciones de un parámetro; S2: Años con mediciones; S3: Media de mediciones (=S1/S2)

i. Embalse de As Conchas. Punto de medición Embalse de Las Conchas (Río Limia)

La serie histórica del punto de control de calidad del agua del embalse de As Conchas presenta un menor número (7) de parámetros objetivo (tabla 18) que, a excepción nitrógeno total, coinciden con los ocho parámetros con mediciones anuales de los dos puntos de control de la Albufera de Valencia.

De los siete parámetros de As Conchas, cinco (conductividad eléctrica, fosfatos, fosforo total, nitratos, nitrógeno total, oxígeno disuelto y pH), tienen mediciones continuadas todos los años (indicador S2 igual a 11), lo que también permitiría que se pudiera realizar un seguimiento estacional al más de una medición anual a partir de 2011 (indicador S3).

Tabla 18. Síntesis de mediciones de parámetros de calidad del agua por año en el punto Embalse de As Conchas.

Parámetros	Años											Indicadores		
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	S1	S2	S3
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	1	10	20	24	6	6	14	4	16	14	3	118	11	10.7
FOSFATOS	6	17	28	30	5	6	14	4	17	17	7	151	11	13.7
FOSFORO TOTAL	6	17	29	30	6	6	13	4	17	16	6	150	11	13.6
NITRATOS	6	17	28	30	5	6	14	4	17	16	7	150	11	13.6
NITROGENO TOTAL	4	6	6	6					1	4	4	31	7	4.4
OXIGENO DISUELTO	6	11	21	17		5	11		12	11	7	101	9	11.2
PH	1	10	20	24	6	6	14	4	16	13	3	117	11	10.6

S1: Total de mediciones de un parámetro; S2: Años con mediciones; S3: Media de mediciones (=S1/S2)

3.5. Fase 5. Análisis de las series temporales y evaluación de la vulnerabilidad de los entornos

3. 5.1. Análisis de las series temporales

Datos climáticos

Las estaciones de Benifaió (Albufera de Valencia) y de Calvos Randín (As Conchas) aportan series temporales completas para temperatura media, precipitaciones, irradiación solar diaria, dirección y velocidad del viento desde el año 2012 hasta 2020. A modo de ejemplo, en la figura 6 se muestran los datos por meses recogidos por ambas estaciones para temperatura, irradiación solar y precipitaciones.

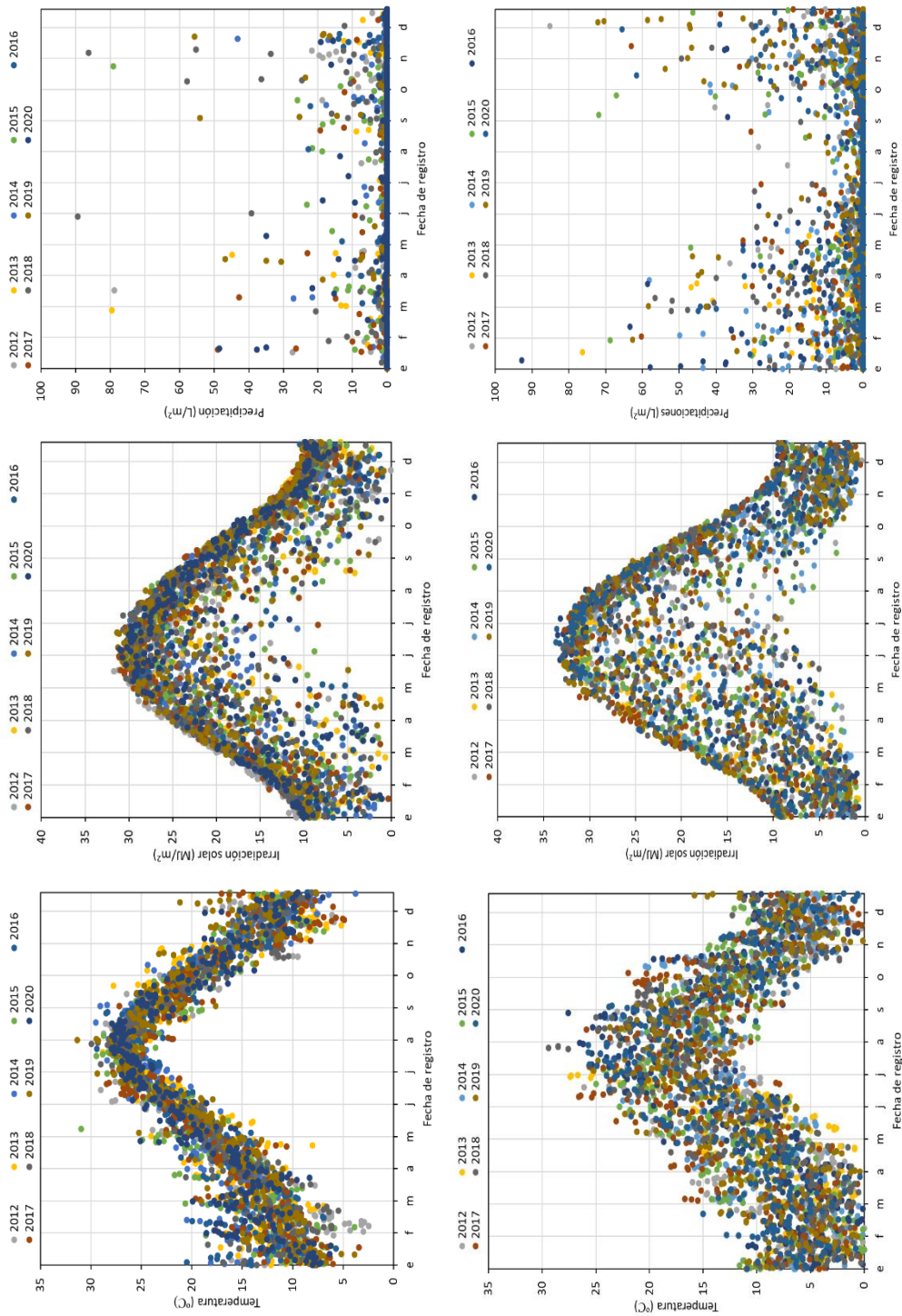


Figura 6. Gráficos de los datos diarios históricos de parámetros por meses para temperatura, irradiación solar y precipitaciones, recogidos por la estación de Benifaió para la Albufera de Valencia (parte superior), y la estación de Calvos Randín para el embalse de As Conchas (parte inferior).

Los datos relativos a la dirección y velocidad del viento, aunque interesantes para entender la agitación y mezcla de las aguas superficiales, y la acumulación de algas y cianobacterias en las masas de agua, no se tuvieron en cuenta en este análisis. A continuación, se comparan las series temporales por parámetro en ambos entornos.

Albufera de Valencia. Estación de Benifaió del IVIA

Durante 9 años de estudio, esta estación recogió las temperaturas medias más altas (por encima de 20 °C) entre los meses de mayo a octubre, lo que coincide con la época de verano en España. El resto del año las temperaturas suelen ser templadas. La irradiación solar diaria coincide con las temperaturas más altas, siendo los meses de abril a agosto los meses donde se registra la mayor irradiación. Las precipitaciones son propias del clima mediterráneo continental, con veranos secos y mayor incidencia, aunque variable, el resto de los meses.

Embalse de As Conchas. Estación de Calvos Randín de Meteo Galicia

El embalse de As Conchas está situado en un clima oceánico, como muestran los datos de temperatura media diaria y precipitaciones recogidos por la estación de Calvos de Randín durante los 9 años de estudio. Las temperaturas medias más altas (por encima de 20 °C) se encontraron entre los meses de junio a septiembre, y el resto del año mostro temperaturas templadas y frías. Las precipitaciones son abundantes y bien distribuidas durante todo el año, aunque con un máximo invernal y un mínimo estival. Asimismo, la mayor irradiación solar coincide con el incremento de temperaturas entre los meses de mayo a septiembre, observando una mayor variabilidad durante los diferentes años y meses a consecuencia de las coberturas provocadas por las precipitaciones y la presencia de nubes.

Datos de calidad de agua

Los análisis de las series temporales de calidad de agua se han realizado para los parámetros con las series de datos más completas y comunes a las dos masas de agua. Estos parámetros han sido la clorofila A, los nitratos, los fosfatos, el oxígeno disuelto, el pH y la conductividad eléctrica, mientras que los datos relativos a nitrógeno y fósforo total no se han tenido en cuenta para simplificar el análisis. Además, debido a la variabilidad temporal de los datos recogidos en los puntos de la Albufera de Valencia (JUI627 y JUC630) y del embalse de As Conchas (MS087FQ, Presa, O Corgo y Portoquintela), se han analizado en conjunto los datos recogidos para distintos puntos de muestreo, pero mismo parámetro y entorno. A continuación, se comparan las series temporales por parámetro en ambos entornos.

Albufera de Valencia. Puntos de medición JUI627 y JUC630.

En la figura 7 se muestran los datos recogidos por los dos puntos de medición en la Albufera de Valencia. Es destacable que, aun habiendo datos durante todos los años para la mayoría de los parámetros estudiados, muchos datos pertenecen al mismo día de muestreo, dificultando el análisis temporal. Tal y como se comentó en secciones anteriores (tabla 17), se muestra que la información fue incompleta durante muchos meses en los 10 años de estudio.

En general se observa una relación entre la clorofila A y el resto de los parámetros. Durante los meses de verano, donde la cantidad de muestreos recogidos fue mayor, se observaron las concentraciones más altas de clorofila A. El aumento de la temperatura y la irradiación solar en la época estival (figura 6), precedido por un aumento de las precipitaciones y la aportación de nutrientes a la laguna, como los nitratos y fosfatos provenientes de la agricultura, pueden explicar la continua proliferación de algas y cianobacterias durante los meses de mayo a agosto. Esta proliferación influyó en el pH obtenido durante dichos meses, pues la actividad fotosintética de estos microorganismos durante su crecimiento exponencial incrementa el pH del agua.

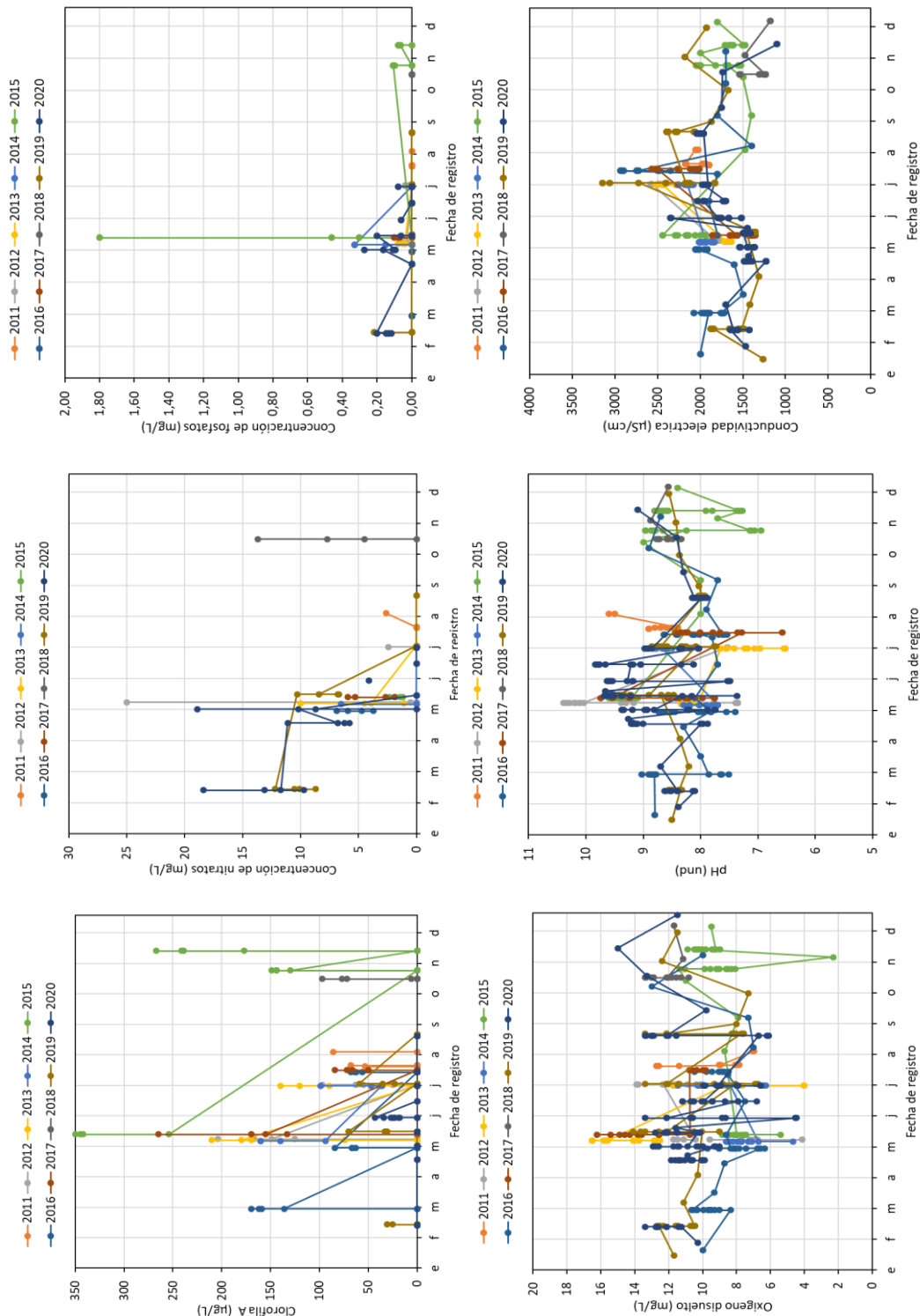


Figura 7. Gráficos de los datos históricos de calidad de agua por meses para clorofila a, nitratos, fosfatos, oxígeno disuelto, pH y conductividad eléctrica, recogidos por los puntos de medición integrados de JUI627 y JUC630 en la laguna de la Albufera de Valencia.

El oxígeno disuelto mostró un cierto aumento durante el mes de mayo, coincidiendo también con el crecimiento de estos microorganismos y su actividad fotosintética. En cambio, no se observó una clara disminución del oxígeno disuelto durante los periodos posteriores al afloramiento, donde los microorganismos descomponedores se alimentan de la biomasa de algas y cianobacterias y suelen consumir el oxígeno disuelto disponible. Por último, también se observa una mayor conductividad eléctrica durante los meses de mayo a agosto.

Por otro lado, la figura 8 muestra las medias, medianas, valores máximos, mínimos y atípicos de las concentraciones de clorofila A recogidos por los dos puntos de muestreo durante los 10 años de

estudio. Estos resultados muestran que los valores de clorofila A suelen superar los 50 $\mu\text{g/L}$, y generalmente se alcanzan valores superiores a 100 $\mu\text{g/L}$ de clorofila A, los que demuestra el carácter hipertrófico de la laguna. Además, se realizó un análisis estadístico univariante para estudiar la evolución de la clorofila A a lo largo del tiempo. El test de normalidad Shapiro-Wilks mostró que las muestras no seguían una distribución normal (tabla 19). Posteriormente, se realizó el test de Kruskal-Wallis para evaluar la igualdad de medias, seguido de un *post-hoc* para estudiar las medias 2 a 2 a través de un test de Dunn con corrección de Hochberg. Los resultados del análisis, recogidos en la tabla 19, muestran que varios años estudiados presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en las concentraciones de clorofila A. En concreto, la media del año 2015 fue significativamente ($p < 0.05$) superior a la mayoría de los años, a excepción de 2014 y 2018. Estos resultados, junto con los de la figura 8, muestran la alta variabilidad e intensidad de los afloramientos de algas y cianobacterias en la laguna de la Albufera a lo largo del tiempo.

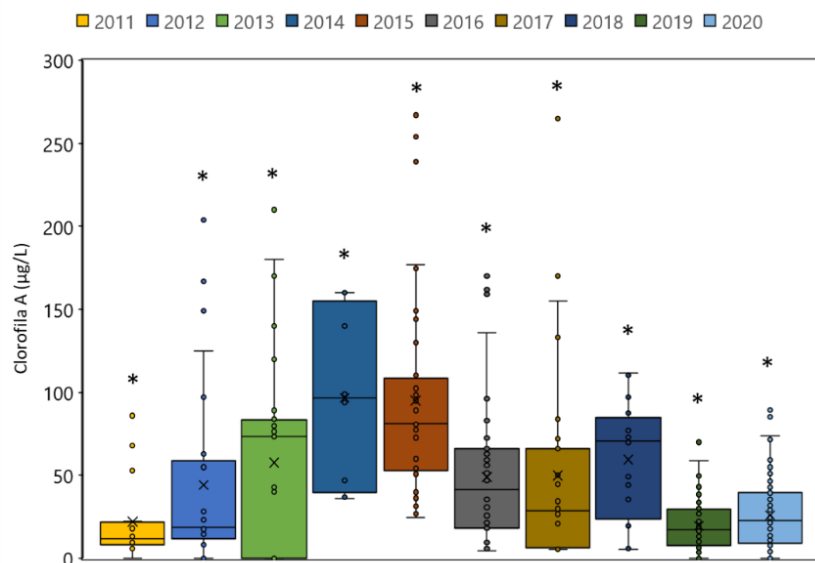


Figura 8. Gráfico de medias, medianas, valores máximos, mínimos y atípicos de las concentraciones de clorofila A recogidos durante los 10 años de estudio en la laguna de la Albufera de Valencia (JUI627 y JUC630). Los asteriscos indican que existen diferencias significativas con algún año.

Tabla 19. Análisis estadístico univariante mediante el test de Kruskal-Wallis sobre los datos de clorofila A recogidos en la Albufera de Valencia (puntos JUI627 y JUC630) durante 10 años. *Post-hoc* de medias 2 a 2 a través de un test de Dunn con corrección de Hochberg.

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
2011	-									
2012	1,00	-								
2013	1,00	1,00	-							
2014	0,01	0,07	0,30	-						
2015	0,00	0,00	0,00	1,00	-					
2016	0,26	1,00	1,00	0,66	0,00	-				
2017	1,00	1,00	1,00	0,19	0,00	1,00	-			
2018	0,08	0,68	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-		
2019	0,96	1,00	0,19	0,00	0,00	0,01	0,85	0,01	-	
2020	1,00	1,00	1,00	0,01	0,00	0,14	1,00	0,07	1,00	-

Diferencias significativas en valores $p < 0.05$

Embalse de As Conchas. Puntos de medición Embalse de Las Conchas (Río Limia)

Las tendencias observadas para los distintos parámetros de calidad de agua en As Conchas son más claras y explicativas (figura 9), pues se da mayor consistencia de los datos recogidos y a la continuidad de los muestreos durante los años de estudio. No obstante, debido a que las muestras para clorofilas se recogen en tres puntos diferentes en el embalse, la figura 9 muestra la clorofila A recogida por todos los puntos de muestreo, mostrándose, en ocasiones, varios datos recogidos en un mismo día. Esto no ocurrió con el resto de los parámetros pues sólo hay un punto de muestreo (MS087FQ).

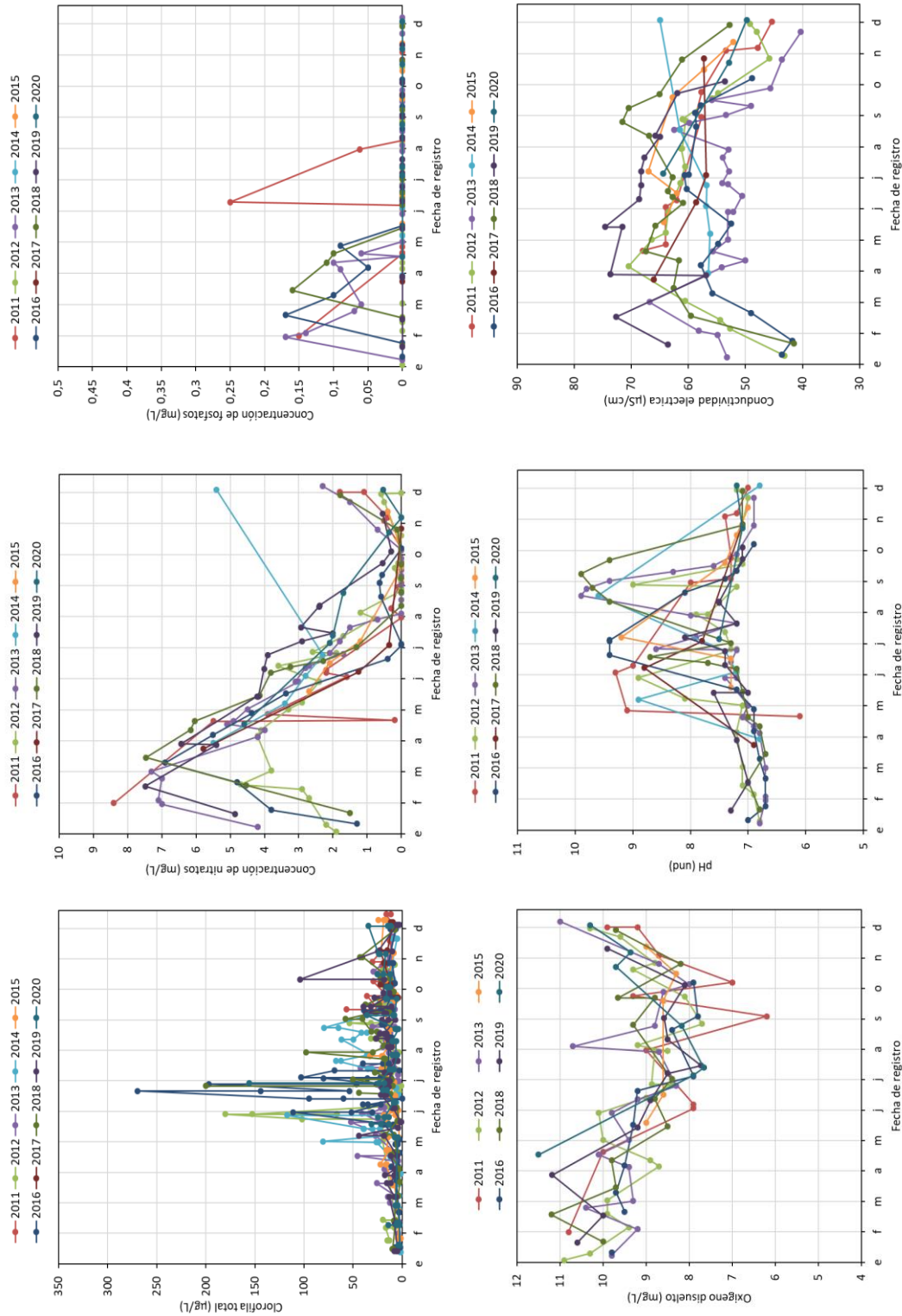


Figura 9. Gráficos de los datos históricos de calidad de agua por meses para clorofila a, nitratos, fosfatos, oxígeno disuelto, pH y conductividad eléctrica, recogidos por los puntos de medición del embalse de As Conchas.

La clorofila A mostró los valores más altos durante los meses de junio y julio, siendo especialmente altos durante algunos años, como los recogidos durante 2016. La proliferación de algas y cianobacterias durante estos meses coincide con el aumento de las temperaturas y de la irradiación solar (figura 6). Asimismo, la proliferación de estos organismos fotosintéticos afectó al pH del embalse, que aumentó considerablemente durante el afloramiento. A su vez, el aumento de las precipitaciones durante los meses de enero a abril influyó en el aumento de nutrientes al embalse, como se observa en las concentraciones de nitratos y fosfatos. Esto puede ser debido a que aguas arriba del embalse (río Limia) se sitúan zonas agrícolas y ganaderas que aportan fuentes de nutrientes difusas por lixiviación. El claro descenso de estos nutrientes durante el afloramiento se debe a su consumo por las algas y cianobacterias. Por otro lado, aunque no hay medidas de oxígeno disuelto para todos los años, se observa que el afloramiento afectó claramente a la cantidad de oxígeno disuelto, ya que normalmente disminuyó durante los meses de septiembre y octubre, a consecuencia de la descomposición de la biomasa del afloramiento. Por último, la conductividad eléctrica varió en función de la época del año, principalmente con relación a la temporada de lluvias y sequía.

Por otro lado, en la figura 10 se recogen las medias, medianas, valores máximos, mínimos y atípicos de las concentraciones de clorofila A obtenidas en el embalse de As Conchas durante los 10 años de estudio. Los resultados muestran que, aunque en algunos años se encontraron valores atípicos que alcanzaron los 300 µg/L de clorofila A, las medias variaron en un rango de 15 a 30 µg/L de clorofila A, lo que corresponde con un estado eutrófico.

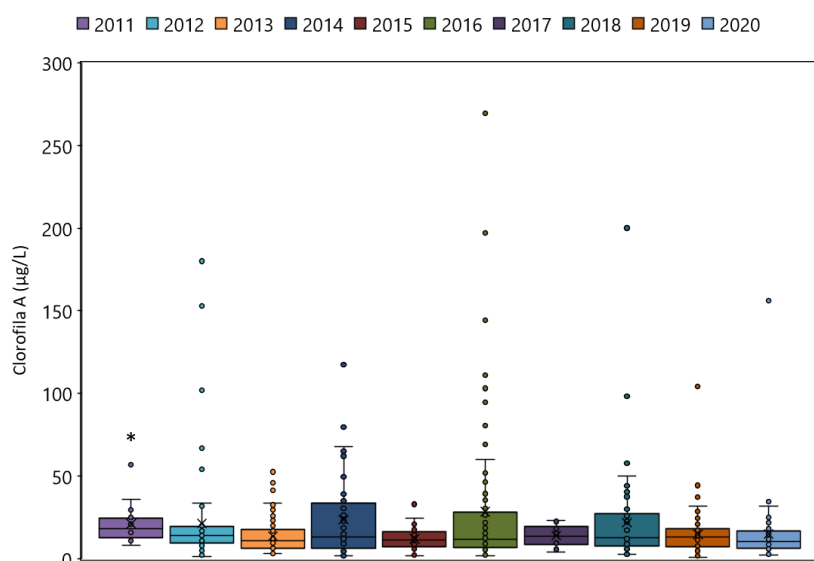


Figura 10. Gráfico de medias, medianas, valores máximos, mínimos y atípicos de las concentraciones de clorofila A recogidos durante los 10 años de estudio en el embalse de As Conchas (Presa, O Corgo, Portoquintela). El asterisco indica que existen diferencias significativas con algún año.

El test estadístico de Shapiro-Wilks demostró que las muestras no siguieron una distribución normal, por lo que se llevó a cabo un análisis estadístico univariante mediante el test de Kruskal-Wallis para evaluar la igualdad de medias, seguido de un *post-hoc* para estudiar las medias 2 a 2 a través de un test de Dunn con corrección de Hochberg. La tabla 20 muestra que solo en 2011 las medias de clorofila A fueron significativamente ($p < 0.05$) diferentes a las de algún año. En concreto, se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) con los años 2013, 2015 y 2020. No obstante, estos resultados pueden estar influenciados por el bajo número de muestras que se recogieron en dicho año (tabla 20).

Por lo tanto, podríamos considerar que el embalse de As Conchas presenta afloramientos de algas y cianobacterias constantes y poco variables a lo largo del tiempo.

Tabla 20. Análisis estadístico univariante mediante el test de Kruskal-Wallis sobre los datos de clorofila A recogidos en el embalse de As Conchas (puntos Presa, O Corgo, Portoquintela) durante 10 años. *Post-hoc* de medias 2 a 2 a través de un test de Dunn con corrección de Hochberg

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
2011	-									
2012	1	-								
2013	0,049	1	-							
2014	1	1	1	-						
2015	0,038	1	1	1	-					
2016	0,75	1	1	1	1	-				
2017	1	1	1	1	1	1	-			
2018	1	1	1	1	1	1	0,98	-		
2019	0,24	1	1	1	1	1	1	1	-	
2020	0,08	1	1	1	1	1	1	1	1	-

Diferencias significativas en valores $p < 0.05$

3.5.2. Evaluación de la vulnerabilidad de los entornos

El análisis de vulnerabilidad se ha realizado en base a los diferentes umbrales de alerta recomendados por la Organización Mundial de la salud (OMS). El establecimiento de estos valores guía representa una herramienta valiosa para valorar la vulnerabilidad de los entornos y para establecer estrategias de gestión del riesgo asociado a los afloramientos. Esto es de especial importancia cuando los afloramientos están dominados por ciertas especies de cianobacterias productoras de toxinas, ya que estas sustancias pueden causar el envenenamiento de animales, seres humanos incluidos. Por lo tanto, es necesario que las aguas de uso recreativo o destinadas a consumo (tras potabilización) sean analizadas y gestionadas de acuerdo con las mencionadas recomendaciones. El árbol de decisión elaborado por la OMS para la gestión de estas situaciones de riesgo establece tres umbrales basados en el conteo de células, la cuantificación de clorofila A y el biovolumen. En términos de clorofila A, niveles iguales y superiores a $1 \mu\text{g/L}$, junto con la presencia de cianobacterias, marcan el nivel de vigilancia, donde se recomienda realizar muestreos frecuentes. Los niveles de alerta 1 y 2 se alcanzan a los 10 y $50 \mu\text{g/L}$ de clorofila A, respectivamente. Alcanzar estos niveles conlleva a aumentar la frecuencia de muestreo y evaluar la presencia de especies tóxicas y toxinas en el agua. Cuando este riesgo existe, se recomienda considerar y aplicar un plan de contingencia para disminuir el impacto.

En primer lugar, la evaluación de la vulnerabilidad de la laguna de la albufera de Valencia (figura 11, izquierda) muestra que la masa de agua está constantemente sometida a situaciones de alerta. Durante los 10 años de estudio, se superó el umbral de vigilancia y se alcanzó el nivel de alerta 1 y 2, a excepción del año 2011, donde no se superó la alerta 1. El nivel de alerta 1 es el que se alcanza más veces, lo que conllevaría a un aumento de la frecuencia de muestreo y a la evaluación de riesgo por toxicidad. No obstante, como se observa en la figura 11 (derecha), la cantidad de muestras recogidas en días diferentes es muy baja durante todo el histórico de datos. Esto, junto con la alta variabilidad e intensidad de los afloramientos (figura 8), evidencia el claro desconocimiento del riesgo asociados a los afloramientos en la laguna y, por tanto, la implementación de sistemas de monitorización en tiempo real se hace indispensable.

Por otro lado, el embalse de As Conchas muestra una vulnerabilidad menor a situaciones de alerta 1 y 2, pero requiere una constante vigilancia (figura 12, izquierda). Aun así, porcentualmente el nivel de alerta 1 es el que más veces se alcanza, recomendándose un aumento en la frecuencia de muestreo y

el análisis de la presencia/ausencia de cianobacterias tóxicas y sus toxinas. Aunque el número de muestras recogidas para clorofila A en días diferentes es mayor a lo observado en la Albufera de Valencia, éstas no fueron constantes y se observó una frecuencia muy baja en algunos años (por ejemplo, en el 2011 y el 2017, donde solo se recogieron 10 y 5 muestras en días distintos) (figura 12, derecha). Por lo tanto, estos resultados apoyan la implementación de sistemas de monitorización en tiempo real en el embalse de As Conchas.

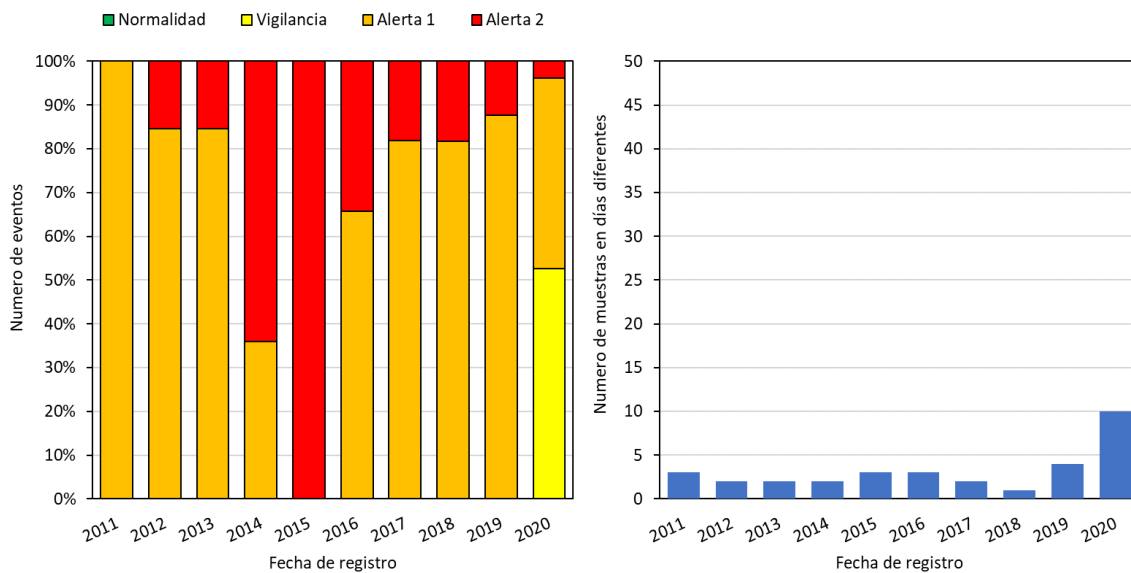


Figura 11. Gráfico de la evaluación de la vulnerabilidad al riesgo asociado a los afloramientos de algas y cianobacterias en la laguna de la albufera de Valencia (izquierda) y gráfico del número de muestras recogidas para clorofila A en días diferentes en los puntos JUI627 y JUC630 (derecha).

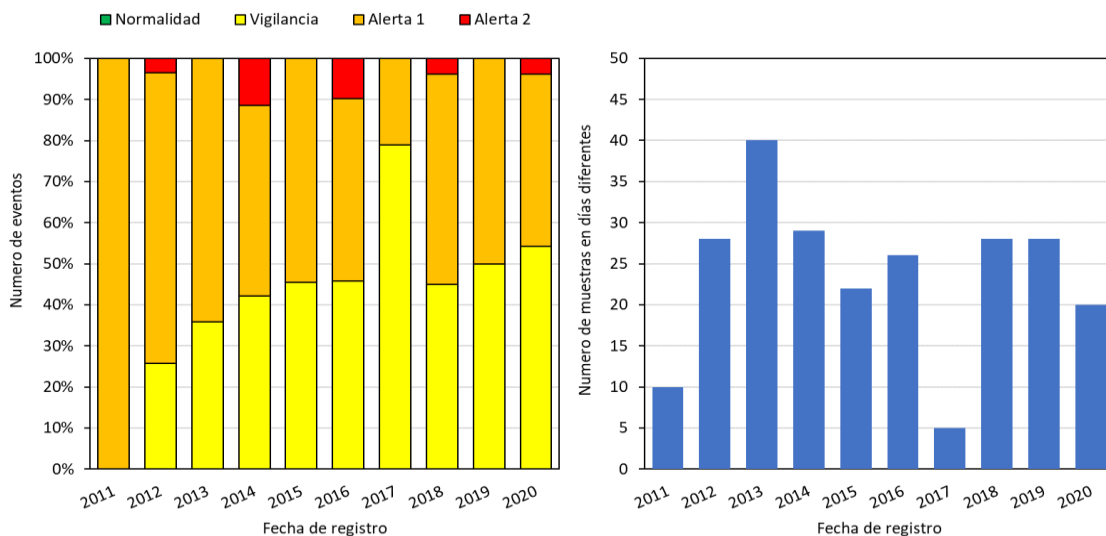


Figura 12. Gráfico de la evaluación de la vulnerabilidad al riesgo asociado a los afloramientos de algas y cianobacterias en el embalse de As Conchas (izquierda) y gráfico del número de muestras recogidas para clorofila A en días diferentes en los puntos de Presa, O Corgo y Portoquintela (derecha).

A.2. La aplicación de Sistemas de Información Geográfica para el análisis contextual basado en la dinámica espacio-temporal de los usos del suelo

1. Justificación

Los usos y coberturas del suelo y su modelo de cambio se consideran de interés para el seguimiento y evaluación temporal del comportamiento de las cianobacterias. Se considera que la presencia de cianobacterias, además, de una combinación de factores, entre los que se encuentran las características del agua y las propiedades climáticas, está relacionada con los usos y coberturas del suelo, así como de su cambio a lo largo del tiempo y el espacio (LUCC). Estos cambios LUCC tienen diversos grados de influencia en la calidad del agua, siendo los usos agrícolas las que tienen más influencia, así como su distribución espacial y distancia a la masa de agua.

Por todo ello, se realiza un análisis de la dinámica espacio-temporal LUCC hasta el momento actual y posteriormente, con los datos obtenidos, se evalúa un modelo geoespacial de cambio para obtener las variables espaciales que inciden en el cambio. Se consideran variables correspondientes al modelo del terreno, litología, impermeabilización, agua y humedad y Red Natura 2000. Estas variables se han evaluado junto con el modelo hasta obtener las significativas y que, además, estuvieran disponibles para el conjunto de Europa.

En consecuencia, el objetivo de esta sección es el establecer la dinámica de cambio en los usos y coberturas del suelo y la evaluación de un modelo de cambio espacio temporal en torno a masas de aguas continentales, tomando como referencia el embalse de As Conchas y la Albufera de Valencia. El estudio incluye la dinámica del cambio, la evaluación de las variables que inciden en la dinámica, la generación de escenarios futuros y la evolución de la capacidad de almacenamiento de agua en los suelos. Parámetros todos ellos relacionados con la calidad del agua y la potencial presencia de cianobacterias.

2. Procedimiento

Para el análisis de la dinámica en los usos y coberturas del suelo se ha establecido un proceso dividido en cinco fases. Se trata de un procedimiento consecutivo en el que cada fase es consecuencia de la anterior (figura 1). Cada fase queda constituida por un procedimiento exclusivo que la identifica (figura 1, columna derecha), quedando determinado por el objetivo general perseguido (figura 1, columna izquierda). De esa manera, se integra una secuencia de causa-efecto que va desde la identificación de los usos del suelo en 1990, 2006 y 2018), y la identificación de las variables espaciales significativas (Fase 1), clasificación de los usos del suelo y categorización de las variables espaciales significativas (Fase 2), modelo espacial de cambio de los usos del suelo (LUCC) (Fase 3), análisis LUCC (1990,2006 y 2018) y escenarios en 2030 y 2050 (Fase 4) y obtención de la capacidad de almacenamiento de agua en suelo (Fase 5). El procedimiento detallado a seguir en cada una de las fases se relaciona a continuación.

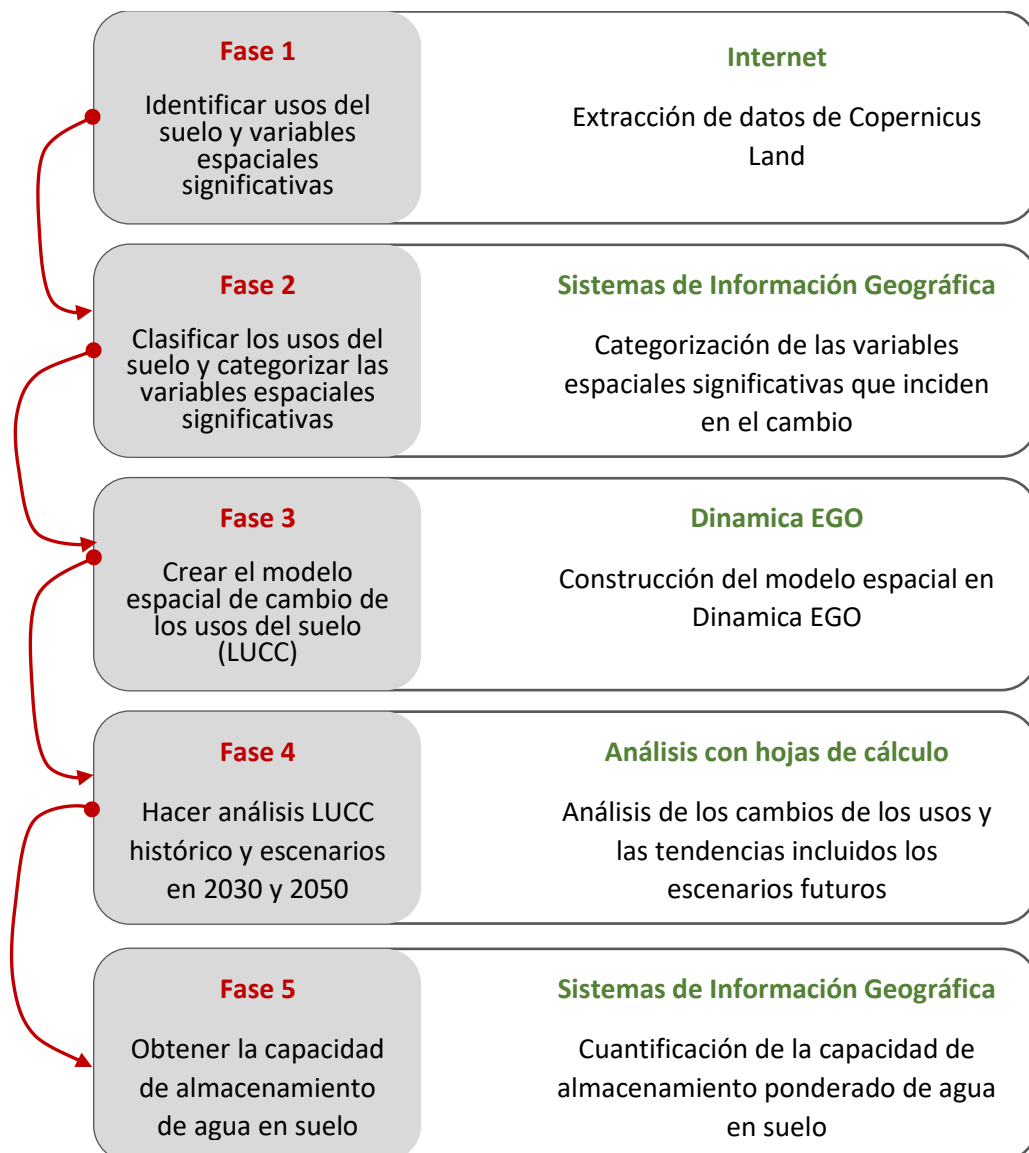


Figura 1. Fases en las que se divide el procedimiento metodológico para el análisis contextual basado en la dinámica espacio-temporal de los usos del suelo (LUCC). Izquierda: objetivo de la fase, derecha: resumen del procedimiento seguido.

2.1. Fase 1. Identificación de los usos del suelo en 1990, 2006 y 2018 y de las variables espaciales significativas

Objetivos

- Determinar los organismos productores de la información de usos y coberturas del suelo y de variables espaciales que inciden en el cambio en los usos del suelo.
- Identificar las series temporales existentes en los repositorios de datos de los organismos objetivo.
- Establecer el procedimiento a seguir para la obtención de las series de datos identificadas como relevantes para el análisis histórico de usos y coberturas.

Metodología

Identificación de los organismos de acuerdo a las características de localización de la masa de agua bajo interés, en nuestro caso, el Embalse de As Conchas y la Albufera de Valencia. Para ello se consultan páginas WEBS de organismos de ámbito autonómico, nacional y europeo.

Análisis de las páginas web de los organismos objetivo identificados en el paso anterior. Se trata de identificar la forma de presentar los datos, su accesibilidad, ámbito territorial, escala de los datos y series temporales susceptibles de ser utilizadas en el análisis temporal.

Obtención de las series temporales de interés y de las variables espaciales, por medio de la descarga directa de los datos cuando existen sistemas interactivos en las páginas web identificadas o, si así se requiere, la solicitud de los datos al organismo competente.

2.2. Fase 2. Clasificación de los usos del suelo y categorización de las variables espaciales significativas

Objetivos

- Reclasificación de los usos del suelo, recorte al ámbito de estudio y exportación a capa ráster.
- Categorización de las variables espaciales, tanto los datos discretos como los continuos, para su incorporación al modelo espacial de cambio de usos. Recorte al ámbito de estudio y exportación a capa ráster.

Metodología

La secuencia de trabajo requiere (1) la reclasificación de las coberturas del suelo, su recorte según el ámbito del área de estudio y exportación a capas ráster para cada uno de los años; (2) exportación a capas ráster de las variables vectoriales, recorte según el ámbito y categorización de todas ellas según los parámetros indicados.

Todos los datos de entrada se convierten a ráster, con píxel de 25x25m y mismo sistema de referencia geodésico ETRS89 y sistema de proyección UTM H30 Norte. Software QGIS.

El procedimiento de trabajo y las herramientas utilizadas es el siguiente:

- Reclasificación de las coberturas del suelo: *Field Calculator*, para generar un nuevo campo con la clasificación de las coberturas (GD1990, GD2006 y GD2018)
- Exportación a capas ráster: *GDAL, Vector conversión, Rasterize* (vector to ráster). Fichero .tif, de 25x25m píxel y valor de la cobertura del suelo. Capa resultante: vlc1990a.tif / asc1990a.tif
- Exportación a capas ráster de las variables espaciales vectoriales y categorización de todas ellas según los parámetros indicados: *GDAL, Vector conversión, Rasterize* (vector to ráster). Fichero .tif, de 25x25m píxel y valor de la categorización. Capa resultante: N2K2012a.tif / geo_1ka.tif

- Recorte de las capas ráster al ámbito extendido de cada área de estudio: *GDAL, Raster extraction, Clip raster by mask layer*. Fichero .tif, de 25x25m píxel y valor previamente calculado. Capa resultante: N2K2012b.tif /IMD2015b.tif.

2.3. Fase 3. Modelo espacial de cambio de los usos del suelo (LUCC).

Objetivos

- Construcción del modelo espacial en Dinamica EGO.
- Obtención de los escenarios futuros 2030 y 2050.

Metodología

Una vez identificadas y caracterizadas mediante su tipo y código los usos del suelo, utilizando el software Dinamica EGO 4.0, utilizando procesos estocásticos se calibra un modelo geoespacial mediante las funciones de cadena de Markov y autómatas celulares (CA). Se utilizan como datos de entrada los usos del suelo identificados y las variables espaciales incidentes en el cambio, una vez categorizadas. En el propio modelo se analiza la relevancia de cada una de las variables para el cambio. Las variables consideradas relevantes se utilizan para la calibración del modelo LUCC y su posterior análisis mediante las herramientas proporcionadas por el SIG.

La secuencia de trabajo continúa (3) la obtención de las matrices de transición de usos del suelo para cada par de momentos temporales; la categorización, relevancia y correlación de las variables espaciales; (4) calibración del modelo geoespacial de cambio; (5) la validación de la simulación del modelo; (6) generación de los escenarios futuros para 2030 y 2050 de las coberturas de suelo para ambas áreas de estudio. Software Dinamica EGO.

Con los datos de los usos del suelo, y mediante el procedimiento de cadena de Markov, se calculan las matrices de transición entre cada uno de los 2 saltos de tiempo.

3. Obtención de las matrices de usos del suelo para cada par de momentos temporales: *Determine Transition Matrix*. Fichero .csv, cobertura origen y final y ratio de cambio por unidad de tiempo. Capa resultante: mult9000.csv / mult1800.csv.tif

Con los datos de las variables espaciales relevantes categorizadas y los usos del suelo se calculan los rangos y los coeficientes de ponderación de las pruebas (WoE, *Weight of Evidence*) de las variables respecto al conjunto de transiciones previamente calculadas. Además, se calcula la correlación WoE de cada par de variables para evaluar su independencia.

4. Categorización y relevancia de las variables espaciales: *Determine Weights of Evidence Ranges and Coefficients*. Fichero .dcf, Variables espaciales con su categorización, los rangos (esqueleto base) y los coeficientes que inducen o retienen el cambio (WoE). Capa resultante: WOEcoef9000a.dcf / WOEcoef1800a.dcf
5. Correlación de las variables espaciales: *Determine Weights of Evidence Correlation*. Fichero .dcf, Correlación entre cada par de variables espaciales con su categorización. Capa resultante: WOEcorr9000a.dcf / WOEcorr1800a.dcf

Con el modelo generado, los datos de entrada, las matrices de transición y los rangos y coeficientes WoE, se procede a realizar la calibración de la simulación entre los años inicial y medio. La calibración se realiza mediante la parametrización de la media, la varianza y la isometría de los polígonos de cada una de las transiciones posibles. Para la mejora de la calibración se juntan en primer lugar la media y

la varianza de cada transición para posteriormente ajustar la isometría de la forma de los polígonos, así como la proporción de los dos autómatas celulares (*patcher* y *expander*).

- Calibración modelo geoespacial de cambio (figura 2), con las matrices de transición, las variables espaciales categorizadas y los dos motores del autómata celular. Obtenemos el mapa de las coberturas simulado (25x25m píxel) y el mapa de probabilidades de cambio (25x25 píxel). Funciones: *Calc WoE Probability Map*, *Calc Change Matrix*, *Expander* y *Patcher*. Capas resultante: *lands_m18b4.tif* / *prob_m18b4.tif*

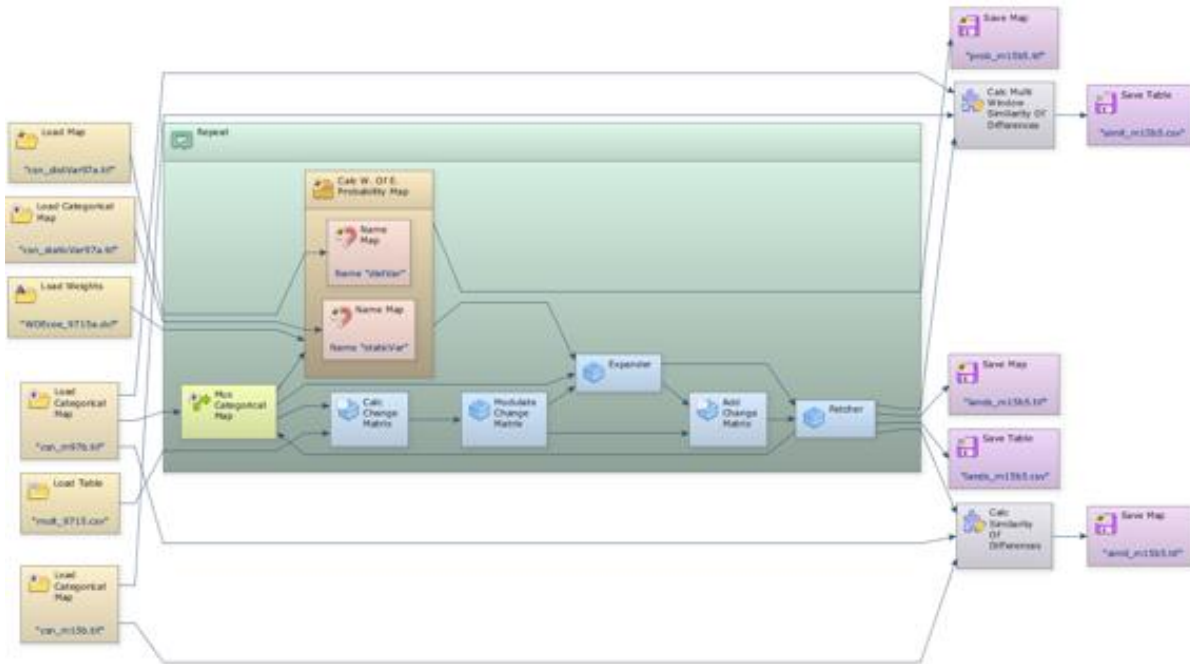


Figura 2. Modelo geoespacial de cambio para los usos del suelo. Datos de entrada: ráster de usos del suelo, matrices de transición y ráster de variables espaciales. Datos de salida: ráster de usos del suelo simulado, ráster de probabilidades de cambio de usos, datos numéricos de la validación. Software Dinamica EGO

Se comprueba la calidad de la calibración del modelo mediante funciones de disminución exponencial (*Similarity of Differences* y *Multi Window Similarity of Differences*) y de similitud recíproca (*Reciprocal Similarity*) entre las coberturas del año final y las simuladas.

La calibración realizada entre los años inicial y medio, se valida mediante la comprobación de la calidad del modelo entre los años medio y final.

- Validación modelo geoespacial de cambio y de la simulación realizada por el modelo. Obtenemos mapas de similitud (25x25m píxel), tablas y textos de porcentajes de similitud entre simulación y cobertura real: *Calc Similarity*, *Multi Window Similarity* y *Calc Reciprocal Similarity Map*. Capas resultantes: *simil_m18b4.tif* / *simil_m18b4.csv* / *sfirts_m18b4.txt*

Con el modelo generado en el software Dinamica EGO se busca simular momentos temporales en el futuro, los escenarios, considerando que las tendencias observadas en el pasado continuarán a lo largo del tiempo.

Para ello utilizamos las coberturas del año final y obtenemos las coberturas de escenario 1 y escenario 2, manteniendo las matrices de transición y las variables espaciales relevantes.

- Generación de escenarios con el modelo geoespacial de cambio, con las matrices de transición, las variables espaciales categorizadas y los dos motores del autómata celular. Obtenemos el

mapa de las coberturas simulado en los escenarios futuros (25x25m píxel) y el mapa de probabilidades de cambio (25x25 píxel): *Calc WoE Probability Map, Calc Change Matrix, Expander y Patcher*. Capas resultantes: lands_m30a.tif / prob_m50a.tif

2.4. Fase 4. Análisis LUCC (1990,2006 y 2018) y escenarios en 2030 y 2050).

Objetivos

- Análisis de los cambios a lo largo del tiempo de la superficie de los usos del suelo.
- Análisis de las tendencias incluidos los escenarios futuros.

Metodología

Con los datos obtenidos de las coberturas y sus cambios a lo largo de la serie temporal, y la inclusión de los escenarios obtenidos del modelo geoespacial de cambio, analizan las tendencias con sus diferencias y similitudes.

La secuencia de trabajo continúa con el análisis de los datos obtenidos, tanto de los usos históricos como de los usos en los escenarios futuros. Software Hoja de Cálculo.

9. Cálculo de la superficie y porcentaje de cada uno de los tipos de coberturas para cada momento temporal (1990, 2006 y 2018) y cada escenario (2030 y 2050). Obtenemos el porcentaje de superficie de cada tipo de cobertura. Funciones: Hoja de cálculo, operaciones simples y obtención de gráfica. Datos resultantes: usos del suelo VLC y ASC.
10. Gráfica de barras con porcentaje de superficie para cada uno de los usos de suelo y año. Datos resultantes: gráfica usos del suelo VLC y ASC.

Obtención de la variabilidad de los usos del suelo para los periodos 1990-2006 y 2006-2018 y de la similitud y diferencia entre el modelo simulado y los usos del suelo. Software Dinamica EGO.

11. Cálculo de la variabilidad de los usos del suelo: *Lm Calc Mean Patch Size and Standard Deviation y Calculate Categrorical Map*. Capas resultantes: stat_0618.csv
12. Cálculo de la similitud y diferencia entre el modelo simulado y los usos del suelo. *Calc Similarity of Differences*. Capas resultantes: simil_vlc018d.tif / simil_asc018d.tif

2.5. Fase 5. Obtención de la capacidad de almacenamiento de agua en suelo (1990,2006 y 2018) y escenarios en 2030 y 2050).

Objetivos

- Cálculo del almacenamiento de agua para cada uso del suelo
- Cálculo de la capacidad de retención de agua para cada tipo de cobertura y total para cada momento temporal.

Metodología

Por último, el trabajo continúa (8) obtención de la retención de humedad (mm) para cada asociación de suelos; (9) unión entre las capas vectoriales de las coberturas de suelo y la de suelos con la aplicación de la capacidad de retención de humedad y el cálculo de la capacidad de retención de agua de cada polígono resultante de la unión; (10) cálculo de la capacidad de retención de agua para cada tipo de cobertura y total para cada momento temporal. Obtención del porcentaje de acumulación de agua para cada momento temporal. Software QGIS y Hoja de cálculo.

13. Retención de humedad de cada asociación de suelo a partir de su capacidad de retención de agua (%) y la potencia media de cada asociación: Hoja de cálculo, operaciones simples. Datos resultantes: asociaciones de suelos VLC y ASC
14. Cálculo del almacenamiento de agua para cada uso del suelo. Mediante la unión entre las capas vectoriales de los usos y la de asociaciones de suelos con la aplicación de la capacidad de retención de humedad: *Vector overlay, Union*. Fichero .shp, vectorial con el valor de la capacidad de retención de humedad del suelo para cada polígono resultante de la unión. Capa resultante: vlc_a18Ew.shp / asc_a18Ew.shp
15. Cálculo de la capacidad de retención de agua del suelo a partir de la cobertura, su grado de impermeabilidad y la capacidad de retención de humedad del suelo: *Field Calculator*, para generar un nuevo campo con la capacidad de retención de agua del suelo. Fichero .shp, vectorial con el valor de la capacidad de retención de agua del suelo para cada polígono resultante de la unión. Capa resultante: vlc_b18Ew.shp / asc_b18Ew.shp
16. Cálculo de la capacidad de retención de agua para cada tipo de cobertura y total para cada momento temporal. Obtención del porcentaje de acumulación de agua para cada momento temporal: Hoja de cálculo, operaciones simples y obtención de gráfica. Datos resultantes: capacidad almacenamiento de agua en suelos VLC y ASC

3. Aplicación

3.1. Fase 1. Identificación de los usos del suelo en 1990, 2006 y 2018 y de las variables espaciales significativas

La tabla que se muestra a continuación es una síntesis de los principales organismos productores de información (tabla 1) encontrados en las consultas en Internet que se han hecho. Algunos tienen competencias territoriales de alcance autonómico o nacional (IDEV, CNIG), otros tienen carácter europeo (Copernicus). La identificación de los organismos de la tabla no excluye la existencia de otros que también pudieran proveer de información similar. Sin embargo, se ha preferido relacionar sólo aquellos que tienen ámbitos territoriales suficientemente amplio (autonómico o más amplio) y que formen parte de estructuras oficiales, o relacionados a sistemas administrativos consolidados y fiables.

En la tabla, se ha punteado, asterisco en rojo, los que son de interés directo para el análisis de datos existentes en las dos zonas estudiadas, As Conchas y la Albufera.

Tabla 1. Principales organismos productores de información sobre coberturas del suelo y variables con interés para el análisis histórico de factores que inciden en la presencia de cianobacterias en aguas continentales.

Organismo	URL
* Copernicus Land Monitoring Service	https://land.copernicus.eu/
* Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG)	https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp
* Instituto Geológico y Minero de España (IGME)	http://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/cartogeo.htm
Infraestructura de Datos Espaciales de España (IDEE)	https://www.idee.es/
Infraestructura Valenciana de Dades Espaciales (IDEV)	https://idev.gva.es/es/inicio
Instituto de estudios do territorio, Xunta de Galicia (IETG)	http://mapas.xunta.gal/visores/descargas/
* De interés para el proyecto CianoMOD	

Datos usos del suelo (LUCC)

Se utilizan las coberturas de suelo de ámbito europeo (Corine Land Cover, CLC) para permitir la máxima aplicabilidad de la metodología. Está compuesta por cartografía e información de clases de cobertura de suelos. Datos digitales en formato vectorial, resolución de polígono de 25 ha, escala de referencia 1:100.000 y una nomenclatura de 44 clases en 3 niveles. Sistema de referencia geodésico ETRS89 y sistema de proyección UTM H30. Obtenida de Copernicus, Land Monitoring Services.

Las coberturas de suelo de Corine Land Cover están disponibles para los años 1990, 2000, 2006, 2012 y 2018. Se utilizan los datos de los años 1990, 2006 y 2018 para tener 3 momentos temporales y 2 saltos de tiempo necesarios para la calibración y la validación modelo.

Datos variables significativas

Se utilizan variables espaciales que tienen influencia en el cambio de cobertura y que tengan una componente esencialmente espacial en su distribución. Las variables evaluadas han sido:

- Formas del terreno: cartografía e información de altitudes, pendientes, orientaciones. Datos digitales en formato ráster, tamaño de píxel de 25 m (Instituto Geográfico Nacional 2018).
- Litología: cartografía e información geológica y litológica.
- Sellado del suelo (IMD2015): cartografía e información sobre el sellado del suelo. Datos digitales en formato ráster, tamaño de píxel de 25 m y una nomenclatura con el grado de impermeabilización de cada píxel de 0 a 100 %. Sistema de referencia geodésico ETRS89 y sistema de proyección UTM H30. Obtenidas del Land Monitoring Service, capas de alta resolución (HRL-High Resolution Layer).
- Agua y humedad del suelo (WAW2015): cartografía e información sobre el agua en y sobre el suelo. Datos digitales en formato ráster, tamaño de píxel de 25 m y una nomenclatura con 5 clases. Sistema de referencia geodésico ETRS89 y sistema de proyección UTM H30. Obtenidas del Land Monitoring Service, capas de alta resolución (HRL-High Resolution Layer).
- Red Natura 2000 (N2K): cartografía e información sobre los espacios naturales protegidos de la Red Natura 2000. Datos digitales en formato vectorial, resolución de polígono de 25 ha, escala de referencia 1:100.000 y una nomenclatura con protegido, entorno y no protegido de cada píxel. Sistema de referencia geodésico ETRS89 y sistema de proyección UTM H30. Obtenidas del Land Monitoring Service, capas de alta resolución (HRL-High Resolution Layer).

Datos capacidad retención agua en el suelo

Se utilizan la capacidad de retención de agua en el suelo y el sellado del suelo.

- Capacidad de retención de agua: cartografía e información de los suelos, clasificación según la Base de Referencia Mundial de suelos (WRB-World Reference Base). Datos de las unidades taxonómica de suelos, característica macromorfológicas, físicas y químicas; entre ellas la capacidad de retención de agua (%). Datos analógicos digitalizados en formato ráster, escala de referencia 1:100.000. Datos digitales en formato vectorial, escala de referencia 1:100.000 y una nomenclatura variable según los suelos dominantes. Sistema de referencia geodésico ED50 y sistema de proyección UTM H30.
- Sellado del suelo (IMD2015): cartografía e información sobre el sellado del suelo. Datos digitales en formato ráster, tamaño de píxel de 25 m y una nomenclatura con el grado de impermeabilización de cada píxel de 0 a 100 %. Sistema de referencia geodésico ETRS89 y sistema de proyección UTM H30. Obtenidas del Land Monitoring Service, capas de alta resolución (HRL-High Resolution Layer).

3.2. Fase 2. Clasificación de los usos del suelo y categorización de las variables espaciales significativas

Clasificación usos del suelo (LUCC)

La nomenclatura de 44 clases de Corine Land Cover (CLC, nivel 3) se ajusta para adaptarse a las necesidades del proyecto y se convierten en 10 clases que agrupan tipos urbanos, agrícolas, forestales, humedales y láminas de agua (tabla 2).

Tabla 2. Conversión entre clases de Corine Land Cover (CLC, nivel 3) y clases del proyecto (código)

Clase	código	Tipos	CLC, nivel 3
Urbanos	10	Urbanos	111-142
Agrícolas	21	Secanos mosaico	211, 231, 241, 243
	22	Secanos arbolados	223, 244
	23	Viñedos	221
	24	Regadíos mosaico	212, 242
	25	Regadíos cítricos	222
	26	Arrozal	213
Forestales	30	Forestales	311-334
Humedales	40	Humedales	411-423
Agua	50	Láminas de agua	511-523

Categorización de variables significativas

Se categorizan las variables espaciales que tienen influencia en el cambio de usos del suelo (tabla 3).

Tabla 3. Variables espaciales relevante y su categorización

variable	categorización	referencia
Alturas	<1m, 2m, 10m, 20m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900m, >900m	CNIG
Pendientes	<1%, 3%, 8%, 15%, 25%, >25%	CNIG
Orientaciones	plano, umbría (N, NE, E, NW, 135º), solana (SE, S, SW, W, 225º)	CNIG
Litología	sin datos; areniscas y conglomerados; areniscas y pizarras; calizas detríticas; calizas; conglomerados evaporita; conglomerados margas versiconoles; conglomerados vulcanitas; cuarzitas; dolomias y areniscas; geneissess; granitoides 2 micas; gravas, arenas y limos; mignatitas; otros granitoides; pizarras; plutonismo; serpentinas; vulcanitas (0-18)	IGME
Sellado del suelo (IMD2015)	no impermeabilizado, 0-25%, 25-50%, 50-75%, 75-100% (1-5)	Land, Copernicus
Agua y humedad (WAW2015)	seco, temporalmente húmedo, permanente húmedo, agua temporal, agua permanente (1-5)	Land, Copernicus
Red Natura 2000 (N2K)	no protegido, buffer 2km y protegido (1-3)	Land, Copernicus

3.3. Fase 3. Modelo espacial de cambio de los usos del suelo (LUCC).

Con el modelo generado, los datos de entrada, las matrices de transición y los rangos y coeficientes WoE, se procede a realizar la calibración de la simulación entre los años 1990 (inicial) y 2006 (medio). Se comprueba la calidad de la calibración del modelo entre los usos del suelo del año 2006 (medio) y 2006 simuladas. La calibración realizada entre los años 1990 (inicial) y 2006 (medio), se valida mediante la comprobación de la calidad del modelo entre los años 2006 (medio) y 2018 (final).

Los escenarios de futuro, momentos temporales en el futuro, para 2030 y 2050, consideran que las tendencias observadas en el pasado continuarán a lo largo del tiempo. Para ello utilizamos las coberturas del año 2018 (final) y obtenemos las coberturas de 2030 (escenario 1) y 2050 (escenario 2). La figura 3 muestra los usos del suelo (LUCC) para cada uno de los momentos temporales 1990, 2006 y 2018 así como los escenarios de 2030 y 2050 para el área de la Albufera de Valencia.

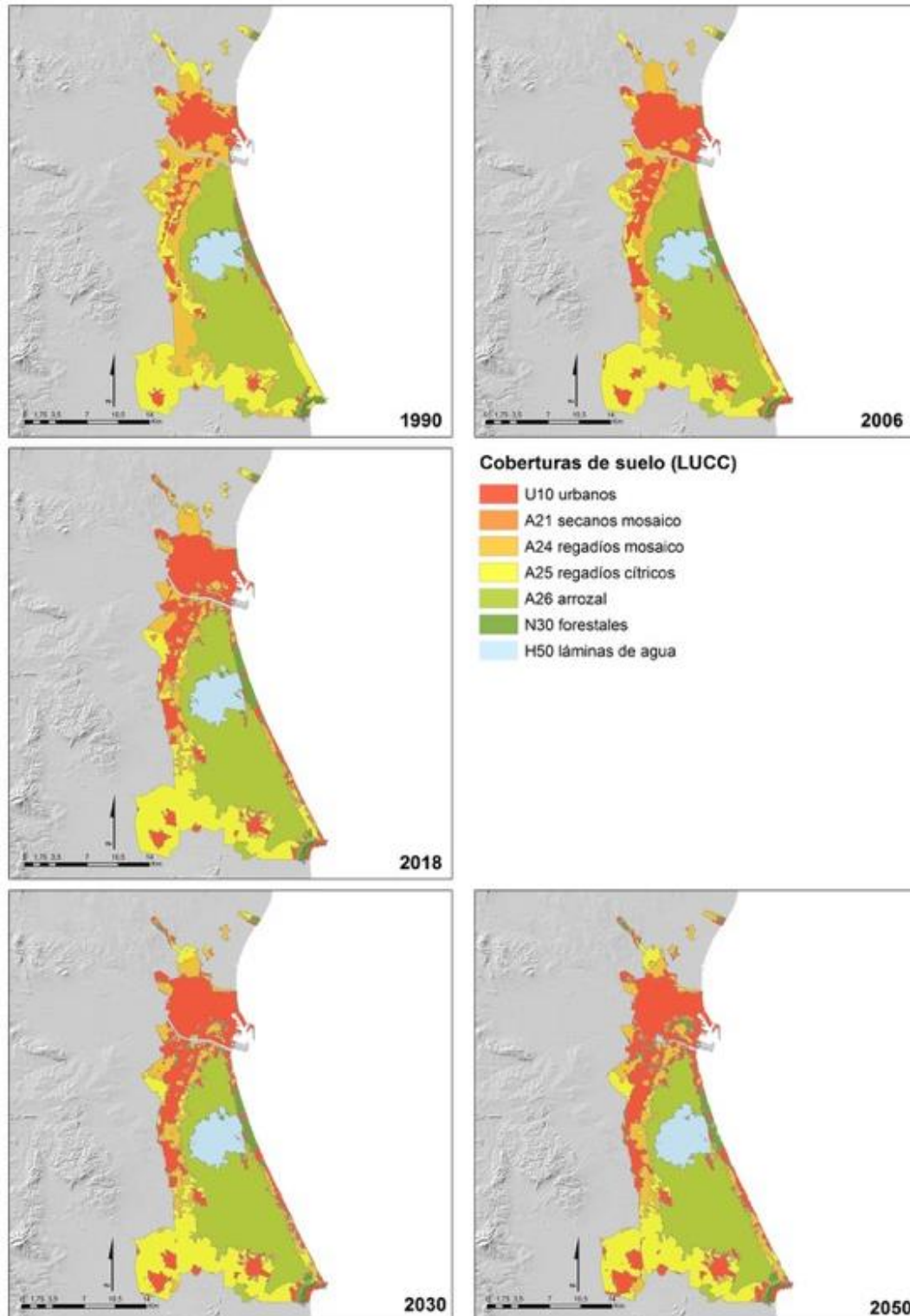


Figura 3. Usos del suelo para los años 1990, 2006, 2018 y los escenarios 2030 y 2050 en el área de la Albufera de Valencia.

La figura 4 muestra los usos del suelo (LUCC) para cada uno de los momentos temporales 1990, 2006 y 2018 así como los escenarios de 2030 y 2050 para el área As Conchas.

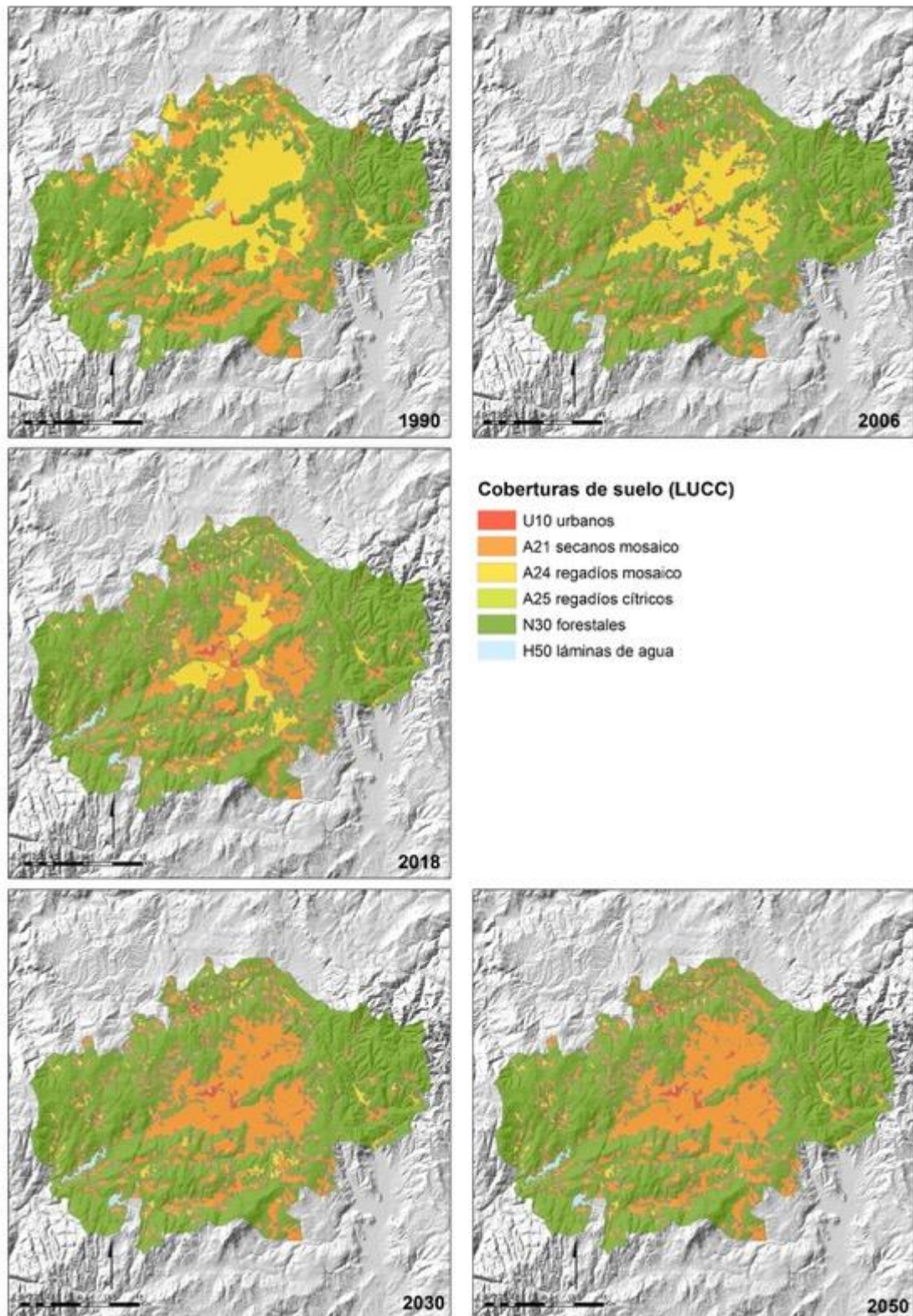


Figura 4. Usos del suelo para los años 1990, 2006, 2018 y los escenarios 2030 y 2050 en el área de As Conchas.

3.4. Fase 4. Análisis LUCC (1990,2006 y 2018) y escenarios en 2030 y 2050).

Para el área de la Albufera de Valencia, la tabla 4 y la figura 5 muestra la superficie y el porcentaje respectivamente de cada uno los usos en cada uno de los años (LUCC). En la figura 6 se muestran la variabilidad de las coberturas, tanto en cambio anual como total. Por último, en la figura 7 muestra la similitud y la diferencia entre las coberturas del suelo para el año 2018 y las coberturas simuladas con el modelo geoespacial de cambio.

Con estos datos se observa que la variación de los usos del suelo para el área de la Albufera de Valencia se está acelerando con los años, siendo los usos urbanos (U10) las que más crecen y los agrícolas las que decrecen, a excepción del arrozal (A26) muy estable. El resto se mantienen muy estables.

Tabla 4. Superficie en hectáreas de cada uno de los usos para cada año. Área de la Albufera de Valencia

Uso	1990	2006	2018	2030	2050
U10	6003.746	8524.149	9697.200	10879.156	11513.988
A21	30.123	171.696	434.436	218.016	324.284
A24	8623.158	6182.838	4798.518	4743.850	5353.562
A25	10084.155	9932.645	10019.451	9222.441	8357.949
A26	14918.729	14929.742	14648.867	14343.625	13672.082
N30	1474.255	1414.525	1367.128	1307.891	1268.164
N50	2620.437	2599.010	2789.005	3039.626	3264.577

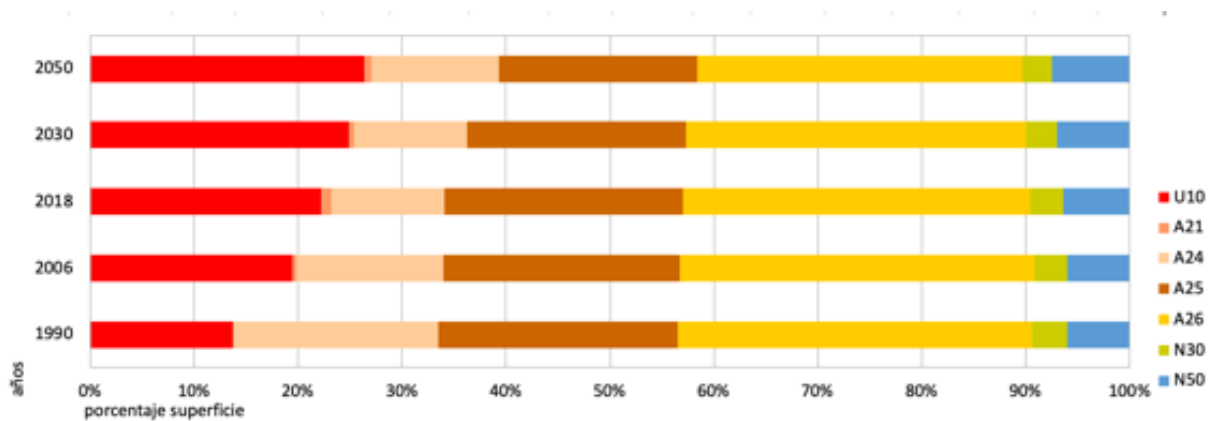


Figura 5. Porcentaje de superficie de usos del suelo para los años 1990, 2006, 2018 y los escenarios 2030 y 2050 en el área de la Albufera de Valencia

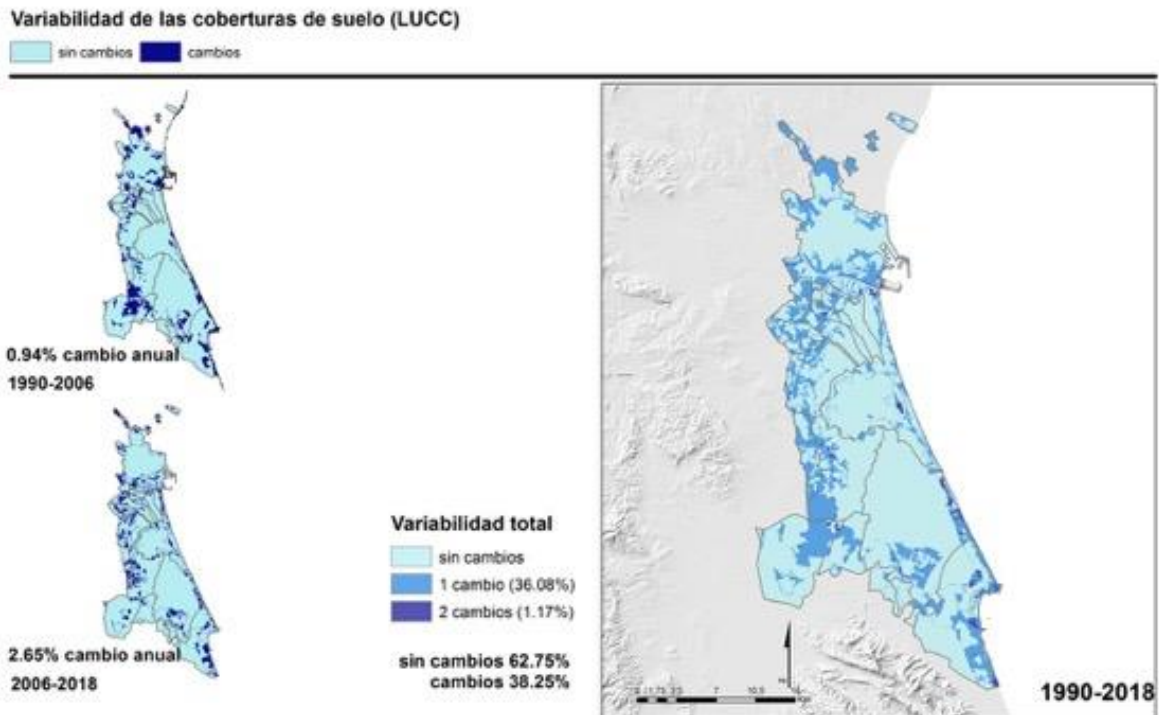


Figura 6. Variabilidad de coberturas del suelo para los periodos 1990-2006 y, 2006-2018 así como la variabilidad total para 1990-2018 en el área de la Albufera de Valencia.

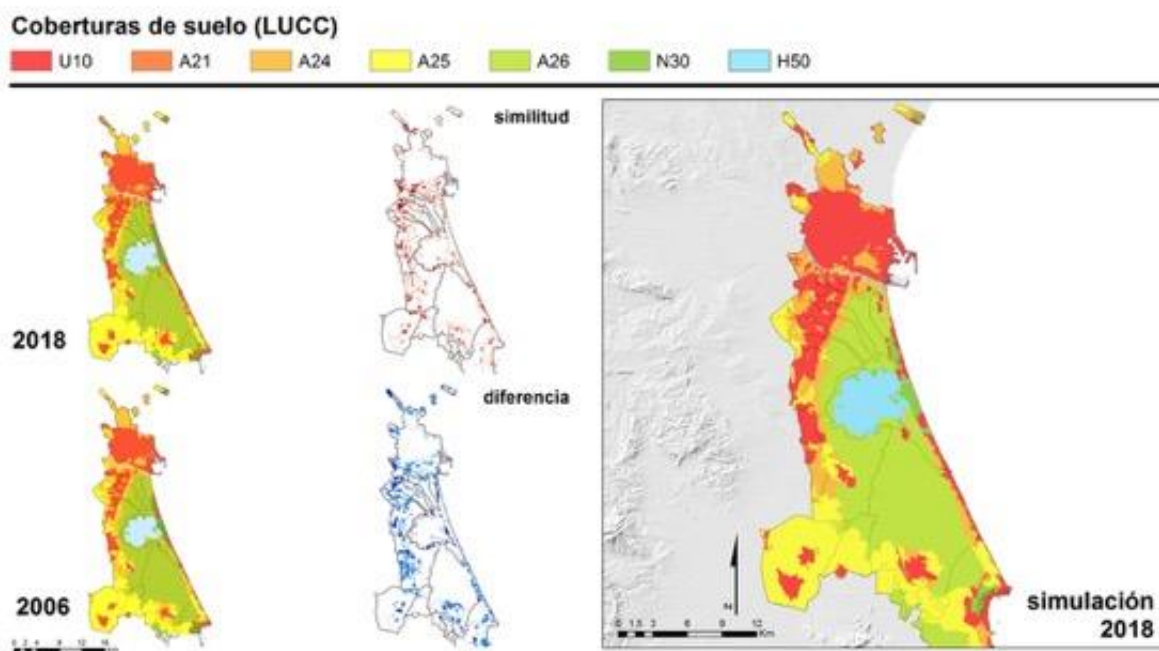


Figura 7. Similitud y la diferencia entre las coberturas del suelo y las coberturas simuladas para el año 2018 en el área de la Albufera de Valencia.

Para el área de As Conchas, la tabla 5 y la figura 8 muestra la superficie y el porcentaje respectivamente de cada uno los usos en cada uno de los años (LUCC). En la figura 9 se muestran la variabilidad de las coberturas, tanto en cambio anual como total. Por último, en la figura 10 muestra la similitud y la

diferencia entre las coberturas del suelo para el año 2018 y las coberturas simuladas con el modelo geoespacial de cambio.

Con estos datos se observa que la variación de los usos del suelo para el área de As conchas está bastante estable y con una ligera deceleración con los años, siendo los usos urbanos (U10) y el agrícola secanos mosaico (A21) los que más crecen, con reducción clara en el resto de los agrícolas. El resto se mantienen muy estables.

Tabla 5. Superficie en hectáreas de cada una de los usos del suelo para cada año. Área de As Conchas

Uso	1990	2006	2018	2030	2050
U10	206.125	1597.312	1731.062	1738.875	1778.750
A21	32235.316	20831.726	37181.992	47531.144	51812.487
A24	37926.277	31464.664	15680.923	6796.019	4478.865
A25	0.000	59.937	32.625	32.625	47.250
N30	104806.772	121351.028	120678.680	119204.307	117179.306
N50	1075.094	944.916	944.302	946.615	952.927

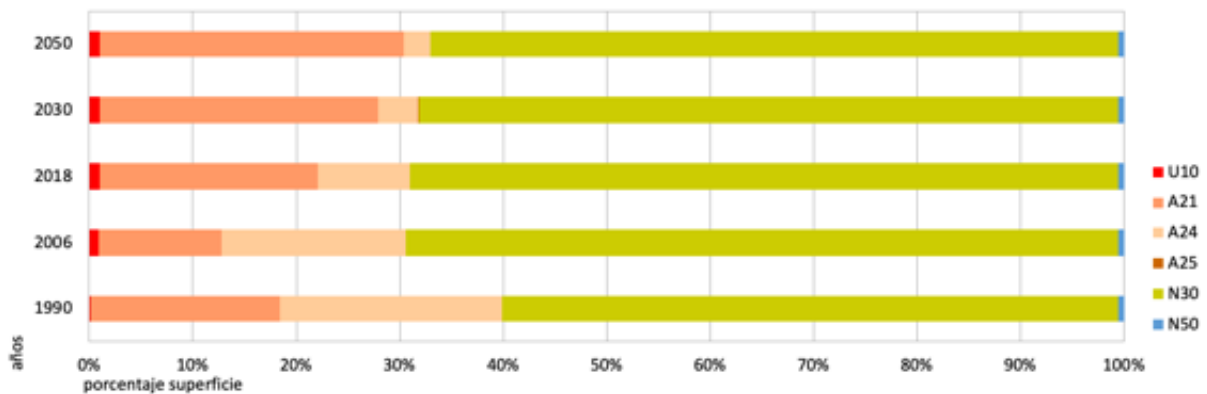


Figura 8. Porcentaje de superficie de usos del suelo para los años 1990, 2006, 2018 y los escenarios 2030 y 2050 en el área de As Conchas.

Variabilidad de las coberturas de suelo (LUCC)

sin cambios con cambios

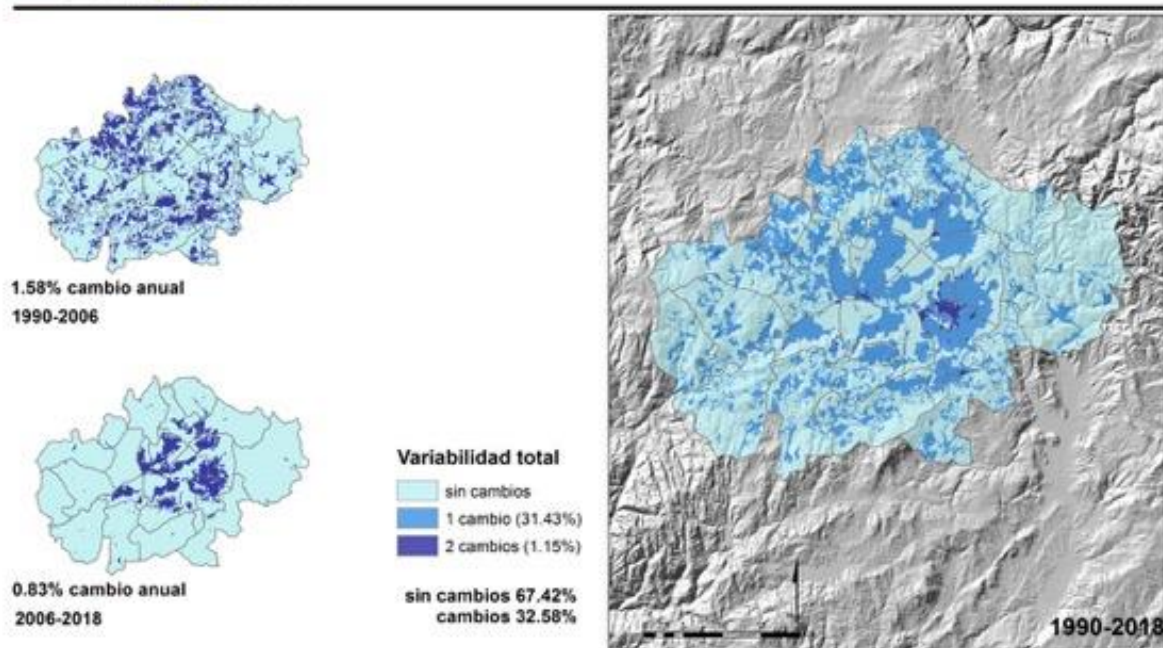


Figura 9. Variabilidad de coberturas del suelo para los periodos 1990-2006 y, 2006-2018 así como la variabilidad total para 1990-2018 en el área de As Conchas.

Cuberturas de suelo (LUCC)

U10 A21 A24 A25 N30 H50

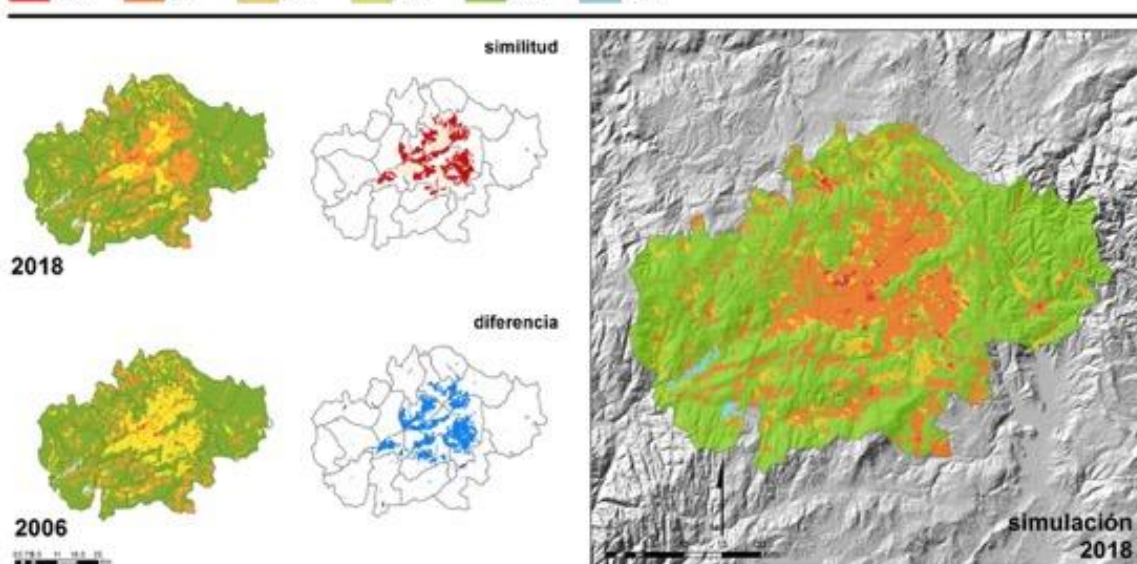


Figura 10. Similitud y la diferencia entre las coberturas del suelo y las coberturas simuladas para el año 2018 en el área de As Conchas.

3.5. Fase 5. Obtención de la capacidad de almacenamiento de agua en suelo (1990,2006 y 2018) y escenarios en 2030 y 2050).

Se utiliza como información base los grupos y asociaciones de suelos del proyecto LUCDEME para el área de la Albufera de Valencia y los Suelos Naturales de la Provincia de Orense así como los perfiles edáficos. A partir de ella, podemos calcular la retención máxima de humedad para cada asociación de suelo que ponderada por la impermeabilización de cada una de las coberturas del suelo. Con ello obtenemos la acumulación de agua para cada una de las coberturas de suelo y momentos temporales. Para el área de la Albufera de Valencia, la tabla 6 y la figura 11 muestran el porcentaje de acumulación de agua de cada uso del suelo en cada uno de los años (LUCC). En la figura 12 se muestran la capacidad de retención de agua de las coberturas del suelo en 5 clases para cada uno de los momentos temporales.

Con estos datos se observa que la variación de las coberturas del suelo para el área de la Albufera de Valencia está haciendo que la capacidad de retención de agua del suelo se reduzca, siendo las coberturas urbanas (U10) las que más influyen al tener una impermeabilización del suelo mucho mayor, lo cual aumenta la escorrentía superficial.

Tabla 6. Porcentaje de acumulación de agua de cada uno de los usos del suelo para cada año. Área de la Albufera de Valencia

Uso	1990	2006	2018		2030	2050
U10	7.873%	11.421%	12.915%		14.561%	15.472%
A21	0.070%	0.140%	0.802%		0.384%	0.693%
A24	20.410%	14.022%	11.184%		11.009%	12.022%
A25	23.802%	24.349%	24.388%		22.562%	20.764%
A26	33.814%	33.861%	33.289%		32.582%	31.040%
N30	1.631%	1.507%	1.474%		1.516%	1.611%
N50	0.000%	0.000%	0.000%		0.000%	0.000%

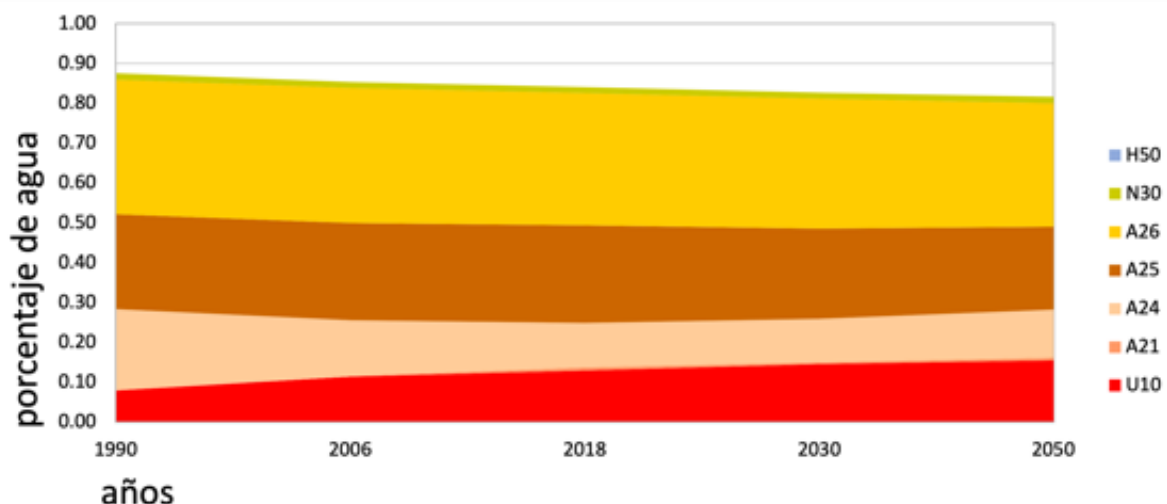


Figura 11. Porcentaje de acumulación de agua de cada uno de los usos del suelo para los años 1990, 2006, 2018 y los escenarios 2030 y 2050 en el área de la Albufera de Valencia

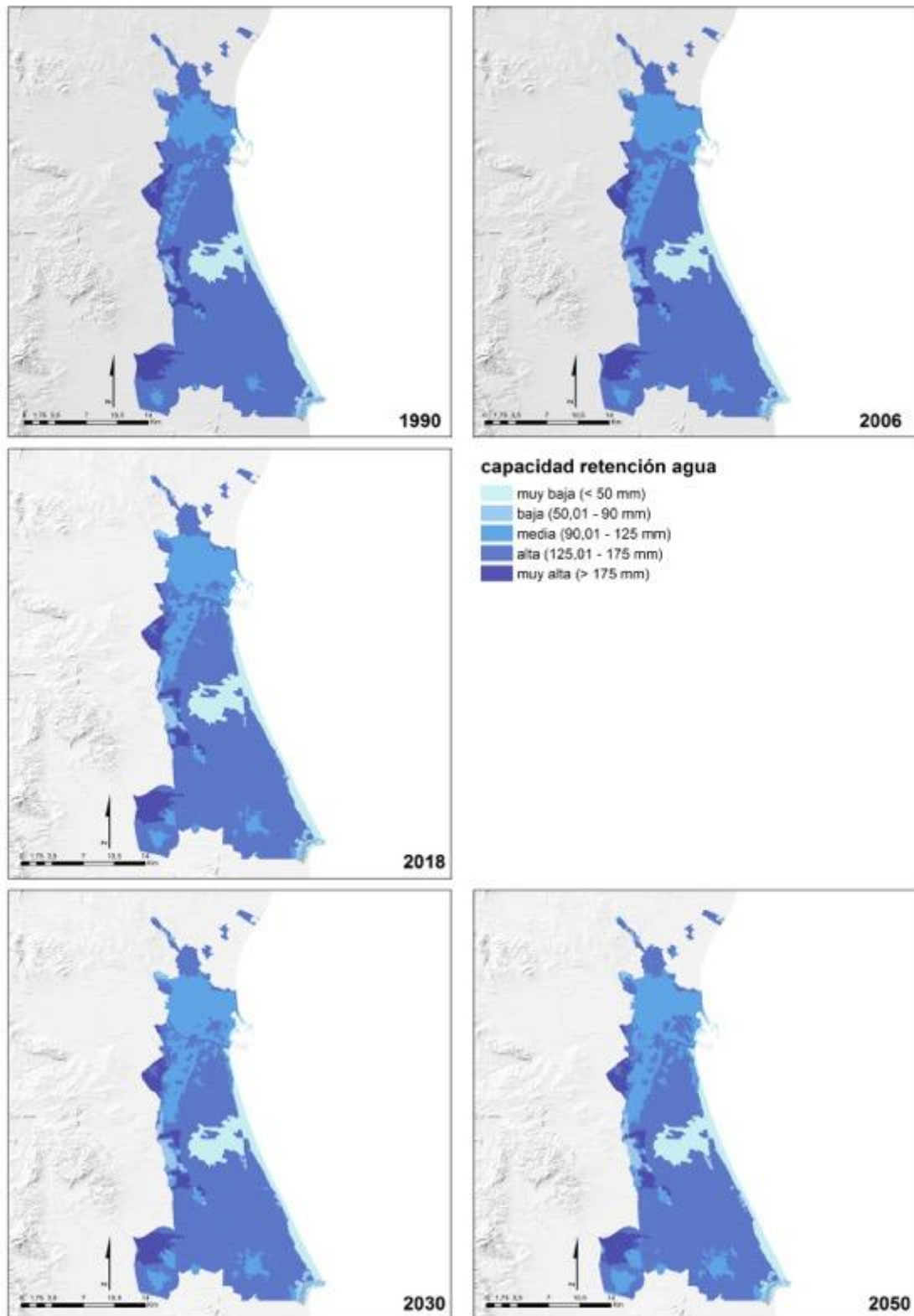


Figura 12. Capacidad de retención de agua de las coberturas del suelo para los años 1990, 2006, 2018 y los escenarios 2030 y 2050 en el área de la Albufera de Valencia

Para el área de As Conchas, la tabla 7 y la figura 13 muestran el porcentaje de acumulación de agua de cada uso del suelo en cada uno de los años (LUCC). En la figura 14 se muestran la capacidad de retención de agua de las coberturas del suelo en 5 clases para cada uno de los momentos temporales. Con estos datos se observa que la variación de las coberturas del suelo para el área de As Conchas está haciendo que la capacidad de retención de agua del suelo se mantenga inalterada, dado el bajo incremento global de las coberturas urbanas (U10) las que más influyen al tener una impermeabilización del suelo mucho mayor.

Tabla 7. Porcentaje de acumulación de agua de cada uno de los usos para cada año. Área de As Conchas

Uso	1990	2006	2018		2030	2050
U10	0.106%	0.804%	0.867%		0.871%	0.890%
A21	20.220%	12.813%	22.569%		29.085%	32.015%
A24	22.839%	19.380%	10.101%		4.520%	2.829%
A25	0.000%	0.016%	0.008%		0.008%	0.015%
N30	50.388%	60.550%	60.051%		59.131%	57.856%
N50	0.000%	0.000%	0.000%		0.000%	0.000%

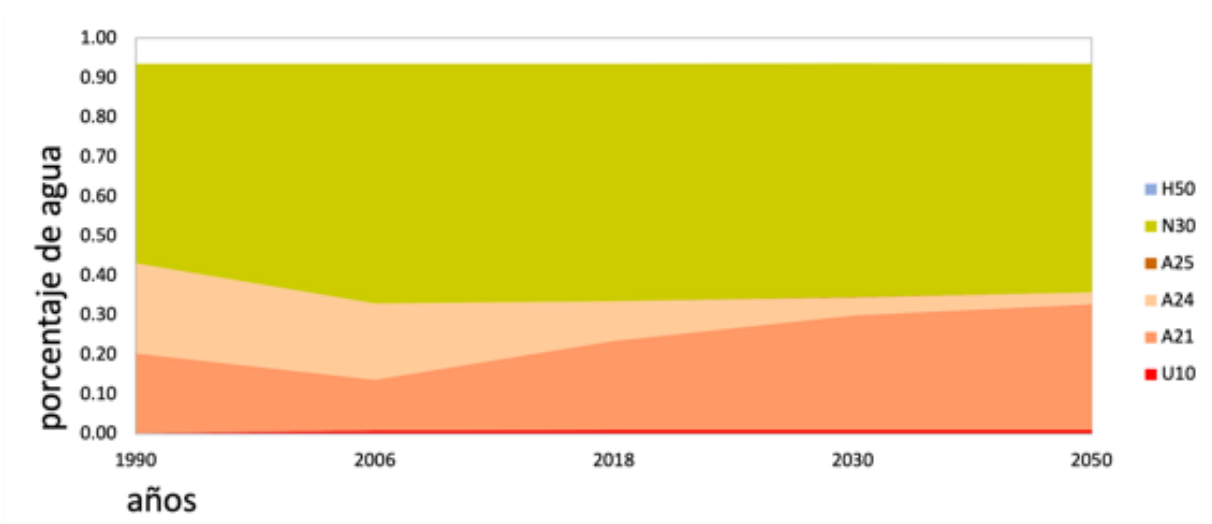


Figura 13. Porcentaje de acumulación de agua de cada uno de los usos del suelo para los años 1990, 2006, 2018 y los escenarios 2030 y 2050 en el área de As Conchas

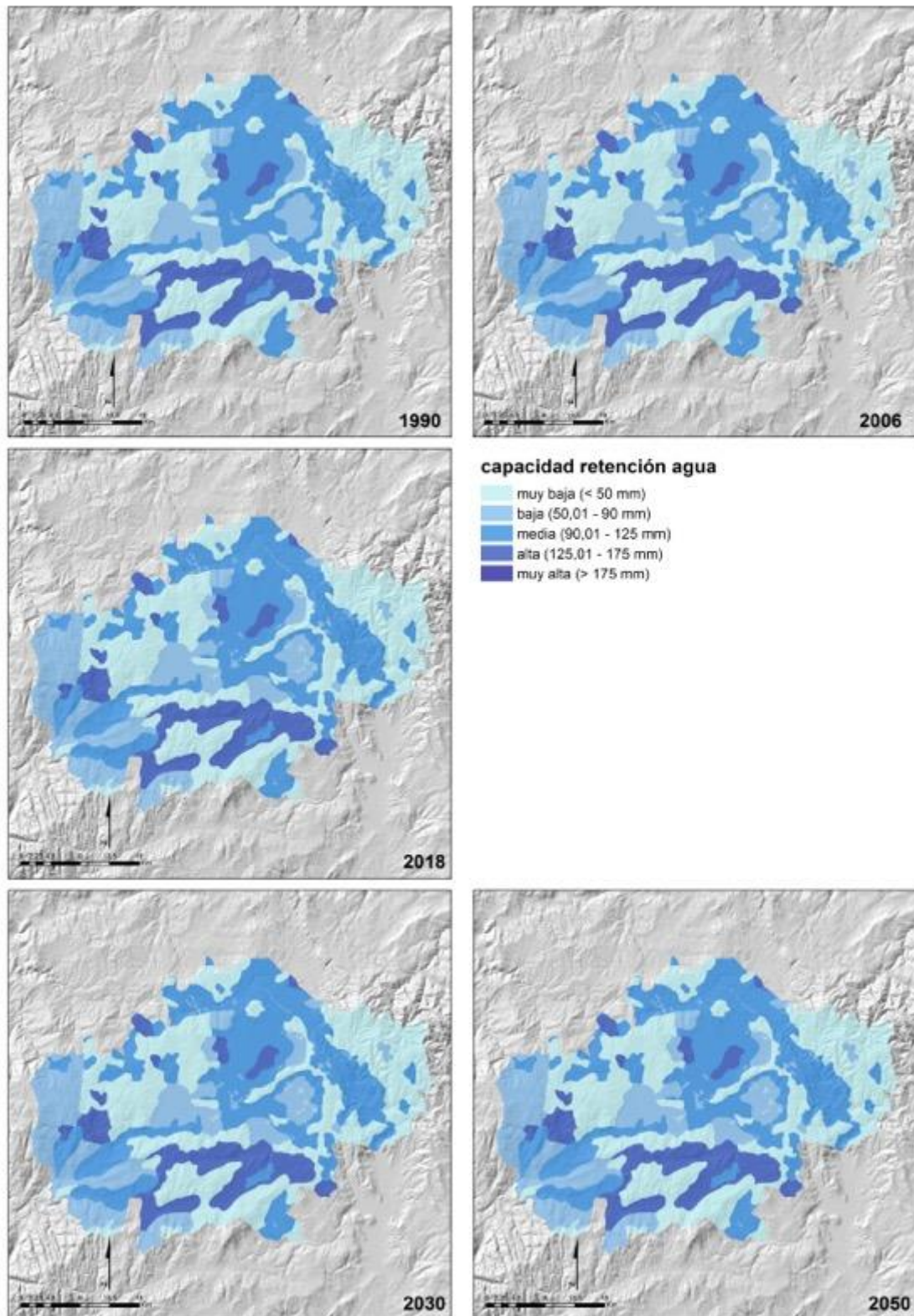


Figura 14. Capacidad de retención de agua de las coberturas del suelo para los años 1990, 2006, 2018 y los escenarios 2030 y 2050 en el área de As Conchas.

A.3. Uso de la teledetección para la evaluación de las masas de agua

1. Justificación

La teledetección, entendida como las técnicas y procedimientos para extraer información del medio a partir de imágenes en diferentes longitudes de onda obtenidas con sensores instalados en plataformas de satélite, es, desde hace décadas, herramienta imprescindible de aplicación ambiental y, también, para el inventario y caracterización de la calidad de las masas de agua.

El agua, como otros objetos, muestra una reflectividad característica a diferentes longitudes de onda, resultado de las moléculas de agua como de los sedimentos, materia orgánica y pigmentos fotosintéticos en suspensión o disueltos en ella. Se puede realizar el seguimiento periódico de una zona para ver cómo evoluciona a lo largo del tiempo a través del cálculo de índices. Los índices cuantitativos y cualitativos ayudan a la monitorización de la proliferación de algas y en algunos casos en la determinación de algunos pigmentos presentes en las masas de agua como es el caso de la clorofila-a, en particular en las longitudes de onda del azul y el rojo.

Cuando se estudian las masas de agua, debe tenerse en cuenta algunas limitaciones propias de las técnicas de teledetección. Para el cálculo de HAB es importante considerar el tamaño de la floración y escoger, en consecuencia, el satélite con el que se va a realizar el estudio, siendo de gran relevancia la resolución espacial de los sensores: por ejemplo, el satélite MODIS tiene una resolución de un kilómetro (con él se pueden detectar grandes floraciones como las que se pueden originar en océanos), mientras que el Sentinel-2 tiene una resolución de hasta 10 metros, más apropiado para superficies más pequeñas como embalses y lagos.

Para detectar la proliferación de algas se utilizan imágenes en las bandas del rojo, verde y azul visible porque las diferencias en el color de las masas de agua son más fáciles de observar. La composición RGB de éstas bandas muestra gamas de color marrón / rojizo que se suele atribuir a las altas concentraciones de fitoplancton; el color brillante es causado por aguas ricas en sedimentos y / o reflexión de fondo poco profundo; y el color oscuro es el resultado de la alta concentración de fitoplancton y / o materia orgánica disuelta coloreada (CDOM).

La mayoría de los algoritmos aplicados para obtener índices cuantitativos y cualitativos se centran en la determinación de la concentración de clorofila-a y la altura de la línea de fluorescencia (FLH). La FLH es un indicador de la energía reemitida por las moléculas de clorofila después de la fotosíntesis. Las bandas espectrales más comunes para analizar los valores de clorofila-a son las regiones del azul-verde (440-550nm) desarrolladas a partir de datos empíricos.

Podemos encontrar distintos índices que se utilizan como indicadores para detectar tipos específicos de algas. El índice de floración de algas nocivas (HABi) se especializa en la detección de algas azules que contienen pigmentos de ficocianina, mientras que el índice de mareas rojas (RI) rastrea la reflectancia de los fotopigmentos de carotenoides. Además, se investiga en la detección de la proliferación de algas por tipo y, como la aparición de las especies varía según la ubicación, es necesario el uso de indicadores específicos para ciertas regiones.

El procedimiento expuesto a continuación detalla la secuencia de trabajo necesaria, desde la obtención de imágenes de satélite hasta el análisis de los resultados obtenidos con ellas en la aplicación de los algoritmos de cálculo de clorofila. Se ha utilizado las imágenes de dos de los satélites cuya resolución espacial es adecuada para masas de agua de las dimensiones de las estudiadas: el satélite landsat 8, aplicado en el embalse de As Conchas y el satélite sentinel 2, aplicado en la Albufera de Valencia y en el embalse de As Conchas.

2. Procedimiento

La metodología se ha dividido en seis fases (Figura 1). En ellas se contempla el proceso completo, desde la identificación de satélites y sensores susceptibles de ser utilizados para la obtención de imágenes con contenidos de clorofila, hasta el análisis comparativo entre los resultados obtenidos en las imágenes y los valores medidos in situ con las boyas instaladas en el proyecto CianoMOD.

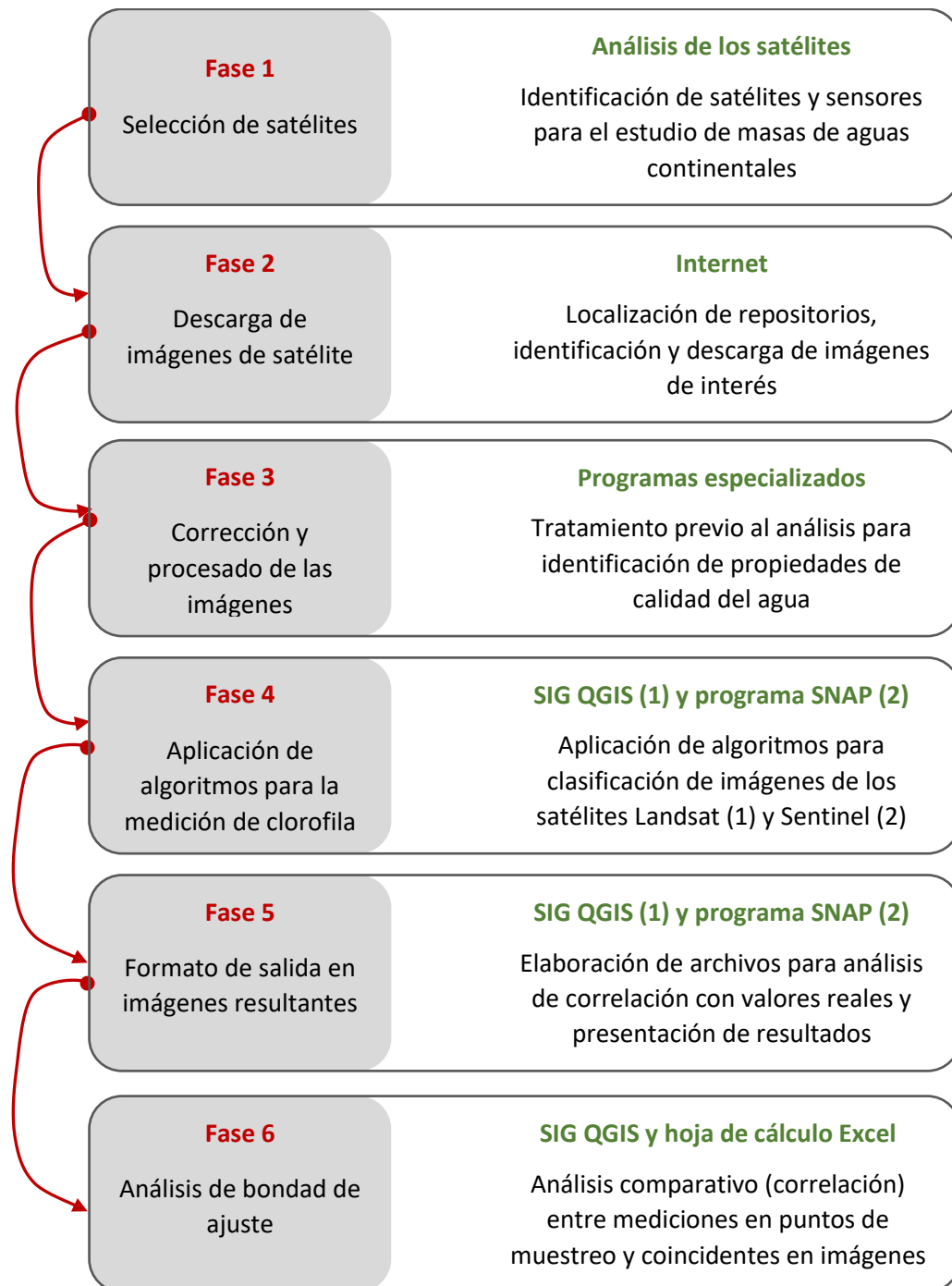


Figura 1. Fases de la metodología aplicadas a las imágenes de satélite para el análisis de clorofila-a. Izquierda objetivos perseguidos en cada fase. Derecha líneas generales del enfoque seguido.

2.1. Fase 1. Misiones de satélites seleccionados

Por sus características y propiedades, en CianoMOD se han procesado y analizado imágenes de las misiones Landsat 8 y Sentinel 2. Por un lado, el satélite Landsat 8 (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>) pertenece al Sistema de Observación de la Tierra de la NASA (EOS) cuyas imágenes se pueden descargar libremente desde diferentes sistemas (<http://landsat.usgs.gov/>). Las características técnicas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones de las imágenes Landsat 8 (Fuente: <http://landsat.usgs.gov/>).

Banda	Región espectral	Nombre	Sensor	Centro banda	Resolución	
1	Costera – Aerosoles	1 Costa	OLI	0.44	30	
2	Azul	2 Azul		0.48		
3	Verde	3 Verde		0.56		
4	Rojo	4 Rojo		0.65		
5	Infrarrojo cercano (NIR)	5 NIR		0.86		
6	Infrarrojo de onda corta 1	6 SWIR1		1.60		
7	Infrarrojo de onda corta 2	7 SWIR2		2.20		
8	Pancromática	8 Pan		0.59		15
9	<i>Cirrus</i>	9 Cirrus		1.37		30
10	Infrarrojo térmico (TIR 1)	10 TIRS1	TIR	10.9	100	
11	Infrarrojo térmico (TIR 2)	11 TIRS2		12.00		

El satélite Sentinel 2 (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>) pertenece al Sistema de Observación de la Tierra Copernicus de la Agencia Espacial Europea cuyas imágenes se pueden descargar gratuitamente desde diferentes sistemas (<https://cophub.copernicus.eu/>). Las características técnicas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 2. Especificaciones de las imágenes Sentinel 2 (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/>).

Banda	Región espectral	Nombre banda	Centro banda (micrómetros)	Resolución (m)
1	Costera – Aerosoles	1 Costa	0.44	60
2	Azul	2 Azul	0.48	10
3	Verde	3 Verde	0.56	10
4	Rojo	4 Rojo	0.65	20
5	Infrarrojo cercano	5 NIR	0.705	20
6	Infrarrojo cercano	6 NIR	0.740	20
7	Infrarrojo cercano	7 NIR	0.783	20
8	Infrarrojo cercano	8 NIR	0.842	10
8a	Infrarrojo cercano	8a NIR	0.865	20
9	Infrarrojo de onda	9 SWIR	0.940	60
10	Infrarrojo de onda	10 SWIR	1.375	60
11	Infrarrojo de onda	11 SWIR	1.610	20
12	Infrarrojo de onda	12 SWIR	2.190	20

2.2. Fase 2. Selección y descarga de imágenes de teledetección.

Los procedimientos de descarga son diferentes para cada tipo de satélite. En el caso de Landsat 8, la búsqueda de imágenes de Landsat 8 se realiza desde el servidor *EarthExplorer* (<http://earthexplorer.usgs.gov>) que proporciona una interfaz de usuario mejorada utilizando

bibliotecas JavaScript, Procesador de Hipertexto (PHP), y el motor espacial de Oracle avanzado. El cuerpo de la aplicación incluye las principales capacidades de exploración de la Tierra y se compone de las funciones de búsqueda de datos y los componentes de Google Map.

Para asegurar la máxima calidad en las imágenes de interés, se han tenido en cuenta otros criterios adicionales que presenta la interfaz como el nivel de procesamiento de la imagen (Data Type Level 1); la cobertura nubosa máxima (Cloud Cover), las condiciones diurnas o nocturnas de adquisición de la imagen (Day/Night Indicator); o las condiciones de observación en nadir o fuera del nadir (Nadir/Off Nadir).

En la lista de imágenes disponibles por sensor, se indica el número total de resultados obtenidos y cada imagen se muestra en una ficha con su información relevante. Una vez seleccionadas las imágenes de interés se procedió a la descarga de éstas. Para las imágenes Sentinel 2, la búsqueda y descarga de imágenes se realiza desde su homólogo de la ESA, la aplicación Copernicus Services Data Hub (<https://cophub.copernicus.eu>).

Las imágenes de Landsat 8 correspondientes al embalse de As Conchas procesadas, son las comprendidas entre el 28 de enero de 2018 y el 27 de mayo de 2020, con un total de 50 imágenes. Respecto a las imágenes Sentinel-2, se han procesado un total de 57 imágenes comprendidas en el periodo del 3 de mayo de 2019 y el 19 de mayo de 2021. Las imágenes de Sentinel- 2 correspondientes a la Albufera de Valencia, son las comprendidas entre el 11 de marzo de 2020 y el 20 de abril de 2021, con un total de 41 imágenes.

2.3. Fase 3. Corrección y procesado de las imágenes de satélite

Las imágenes de satélite vienen dadas en niveles digitales (DN, en sus siglas en inglés) que hay que convertir a radiancia y posteriormente a valores de reflectividad. Al convertir los DN en parámetros físicos (reflectividad) se pueden relacionar con las coberturas presentes en la superficie y, por tanto, normalizar los valores de varias imágenes.

Dependiendo del nivel de procesamiento de las imágenes, para calibrarlas se aplica un método de corrección que pasa el nivel digital a reflectividad considerando una serie de parámetros correspondientes al tipo de sensor: fecha de adquisición de la imagen, ángulo de elevación solar. Estos valores están incluidos en el encabezado de cada imagen.

Además, hay que considerar el efecto que produce la atmósfera en los valores de reflectividad aparente calculados en el paso anterior. Los valores que se obtienen en la reflectividad aparente corresponden a valores de reflectividad aparente en el “techo” de la atmósfera (TOA, Top of the Atmosphere, en sus siglas en inglés) que no es el valor que se obtendría en superficie, es decir, la reflectividad que se mide en el suelo (BOA, Bottom of the Atmosphere, en sus siglas en inglés). Ésta no es la misma que la que llega al sensor debido a que la reflectividad que llega al sensor está influida por las condiciones atmosféricas, el emplazamiento de la cubierta, o localización geográfica y la geometría de observación.

Para poder obtener medidas fiables de los parámetros de calidad el agua es fundamental realizar la corrección de las imágenes y trabajar con valores de BOA, con lo que es necesario aplicar éstas correcciones.

2.3.1 Corrección y procesado de las imágenes landsat 8

Para realizar la corrección de las imágenes Landsat 8, se utilizó el programa de procesamiento de imágenes Semi-Automatic Classification (SCP), que realiza la conversión de ND a temperaturas, y reflectancia con la corrección atmosférica (Dark Object Subtraction) (figura 2).

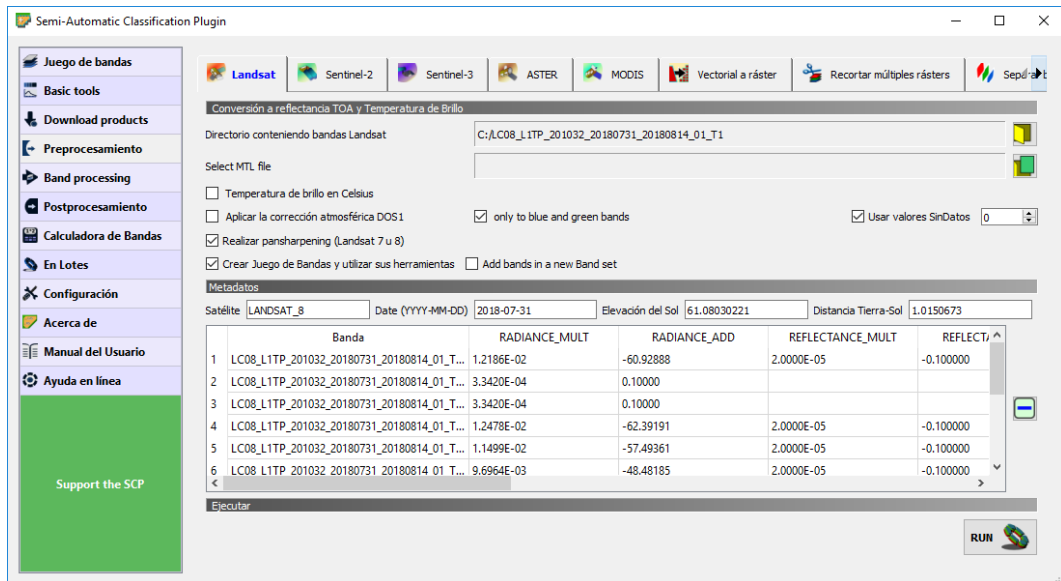


Figura 2. Ejemplo de corrección de imágenes de satélite Landsat 8 con SCP.

2.3.2. Corrección y procesado de las imágenes Sentinel 2

En el caso de las imágenes Sentinel 2, la corrección de las imágenes se ha utilizado la herramienta informática de procesamiento de imágenes SNAP (Figura 3), y el algoritmo de corrección Sen2Cor (<http://step.esa.int/main/snap-supported-plugins/sen2cor/>), desarrollada expresamente para esto a partir de un conocido software de un modelo de corrección atmosférica llamado ATCOR (Melgarejo et al, 2018).

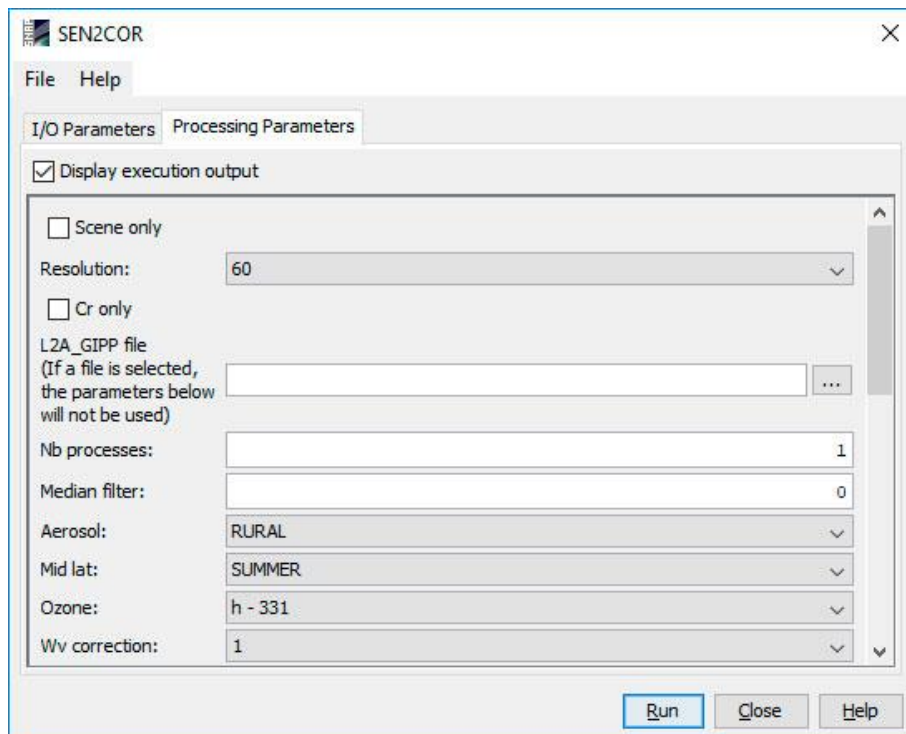


Figura 3. Herramienta Sen2Cor para la corrección atmosférica de las imágenes Sentinel-2.

2.4. Fase 4. Recorte de las imágenes por la zona de estudio.

Para agilizar los tiempos de computación de los procesos y reducir el tamaño de almacenamiento de los resultados, una vez corregidas las imágenes de las escenas completas, se recortan por los rectángulos en los que se insertan las zonas de estudio.

2.5. Fase 5. Algoritmos aplicados para medir la concentración de clorofila mediante teledetección.

2.5.1. Algoritmos de Clorofila Landsat 8

En el caso de las imágenes Landsat 8, se han aplicado 2 algoritmos diferentes para la cuantificación de la concentración de clorofila-a: 1) Shafique; 2) NDBI. El primer algoritmo permite calcular directamente la concentración de Clorofila-a, y el segundo método utilizado nos indica si se dan condiciones para el inicio producción de afloramientos de algas.

Los índices utilizados son modelos matemáticos que se calculan pixel a pixel con los niveles digitales en dos o más bandas de las imágenes, y como resultado se obtendrá una imagen en la que cada pixel va a tener un valor de la concentración de clorofila calculada.

Para aplicar los índices de las concentraciones de clorofila en las distintas fechas se programa cada índice utilizado con el modelador gráfico donde se indican las entradas de datos o "inputs" (por ejemplo, la banda 4 y la banda 5), para que después nos devuelva una salida o "output", que en nuestro caso serán concentraciones de clorofila (Figura 4).

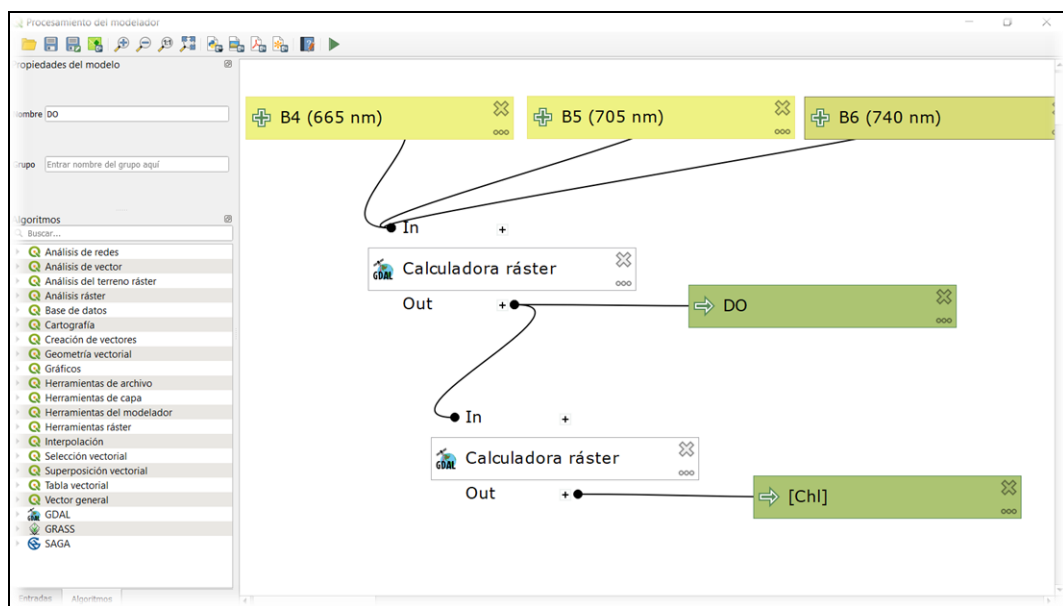


Figura 4. Ejemplo de modelador gráfico en QGIS para el cálculo programado de índices de clorofila.

Los índices utilizados para la determinación de la concentración de clorofila son:

- **Shafique.** El primer índice utilizado, ha sido el propuesto por Shafique et al. (2003) en el que plantea un modelo matemático para la obtención de concentración de clorofila medido en mg/m^3 a partir de las bandas con longitudes de onda de 675 y 705 nm, respectivamente.

$$[Chl] = 48,849 \cdot \left(\frac{705}{675} \text{ nm} \right) - 34,876$$

Siendo 705 y 675 las bandas correspondientes a esas longitudes de onda. En el caso de Landsat8, aplicamos éste índice considerando las bandas 5 (865 nm) y la banda 4 (654 nm).

- **NDBI (Normalized Difference algae-Bloom Index).** Dominguez et al, (2011), realiza un estudio en la Albufera de Valencia. En su estudio aplica el índice NDBI con el que se pueden detectar los afloramientos de algas combinando las bandas correspondientes a las longitudes de onda de 708 y 560 nm.

$$NDBI = \frac{B5(708 \text{ nm}) - B3(560 \text{ nm})}{B5(708 \text{ nm}) + B3(560 \text{ nm})}$$

Establece el siguiente criterio para la lectura de resultados:

- **NDBI < -0,5:** no existe afloramiento. La concentración de clorofila es normal.
- **-0,5 < NDBI < -0,3:** se dan las condiciones para que se inicie un afloramiento. La concentración de clorofila es normal.
- **-0,3 < NDBI < 0:** inicio del afloramiento. La concentración de clorofila está en aumento.
- **NDBI > 0:** existe un afloramiento. Alta concentración de clorofila.

Hay que tener en cuenta que en aguas hipertróficas (con alta concentración de clorofila) cuando el NDBI > 0, no significa necesariamente que ya exista “bloom” algal, puede que sea la situación normal, pero nos ayuda a entender que la probabilidad de que ocurra este fenómeno es mayor.

En el caso de Landsat 8, no dispone de esas longitudes de onda exactamente, por lo que se utiliza las más cercana, en este caso la banda 5 (865 nm) y la banda 3 (561 nm).

2.5.2. Algoritmos de Clorofila Sentinel 2

En el caso de las imágenes Sentinel 2, la corrección de las imágenes se ha utilizado la herramienta informática de procesamiento de imágenes SNAP, y el algoritmo de corrección C2RCC (Procesador Regional CoastColour de Caso 2) que utiliza una gran base de datos de radiancias de pw y TOA simuladas (figura 5).

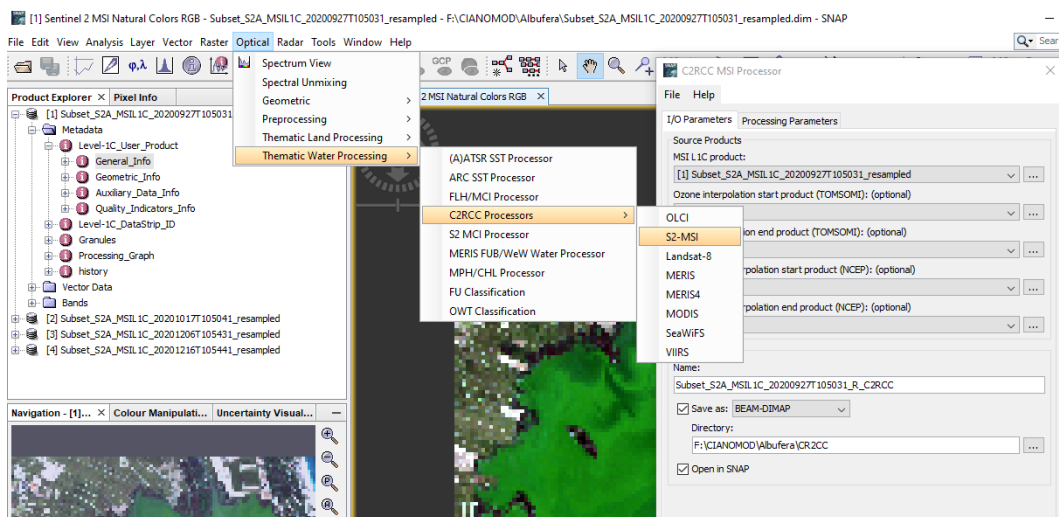


Figura 5. Ejemplo del modelo C2RCC implementado en SNAP.

Para ajustar el algoritmo a nuestras zonas de estudio, se introducen algunas variables (Figura 6) tomadas de las propias sondas instaladas del proyecto (salinidad, temperatura, altura), y el resultado, es una imagen con las concentraciones de clorofila-a calculadas (Figura 6).

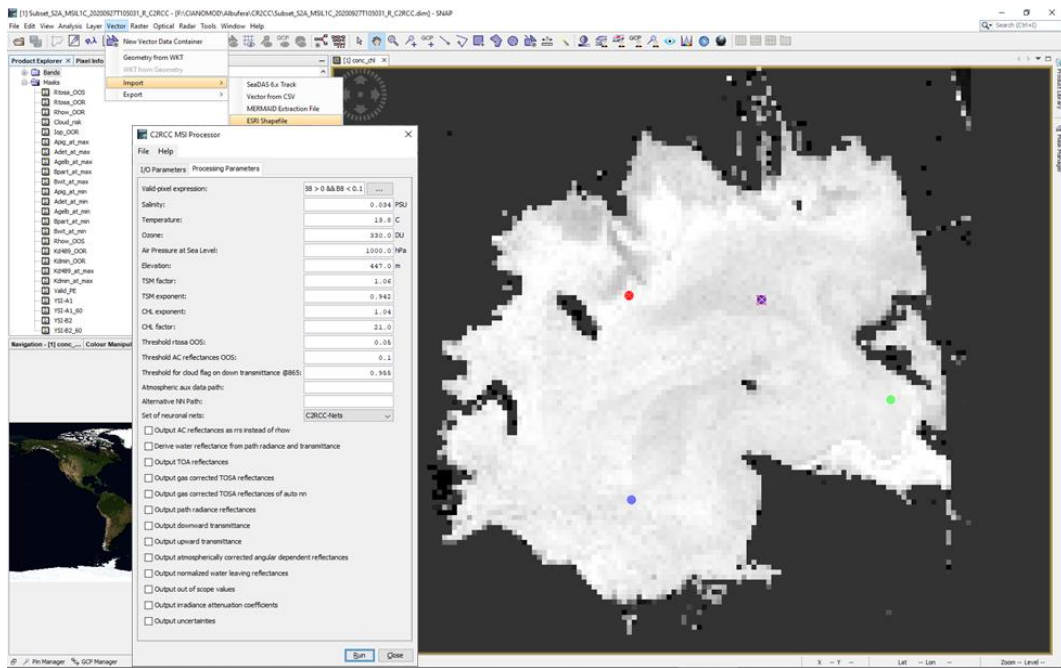


Figura 6. Imagen con la concentración de Clorofila-a obtenida con el modelo C2RCC en la Albufera con las capas vectoriales de los puntos con las boyas (YS-A1, A2, B1 y B2) con el cuadro diálogo de las variables del modelo C2RCC.

2.6. Fase 6. Imágenes de salida con las concentraciones de clorofila-a

Los datos de salida del componente de teledetección de la arquitectura del sistema, corresponden a dos grupos de imágenes:

- Imágenes de las bandas procesadas de los satélites Sentinel 2 y Landsat 8. Las imágenes son archivos TIF, nombrados con la siguiente estructura.

AAAAMMDD_SS_BB.tif

AAAAMMDD = Año, mes y día de la adquisición de la imagen.

SS = Sensor ("L8" = Landsat 8; "S2" = Sentinel 2).

BB = Banda.

- Imágenes de los diferentes índices aplicados para calcular la concentración de clorofila. Las imágenes son archivos TIF, nombrados con la siguiente estructura.

AAAAMMDD_SS_CCCC.tif

AAAAMMDD = Año, mes y día de la adquisición de la imagen.

SS = Sensor ("L8" = Landsat 8; "S2" = Sentinel 2).

CCCC = **Índice clorofila aplicado** ("SHAF" = Shafique; "DELE" = Delegido; "NDBI" = Normalized Difference algae-Bloom Index).

En la figura 7 se muestra un ejemplo de la salida resultante de las imágenes con los valores obtenidos de Clorofila-a, correspondiente al mes de mayo de 2020, donde se puede observar la distribución espacial de la concentración de Clorofila-a en ambas masas de aguas.

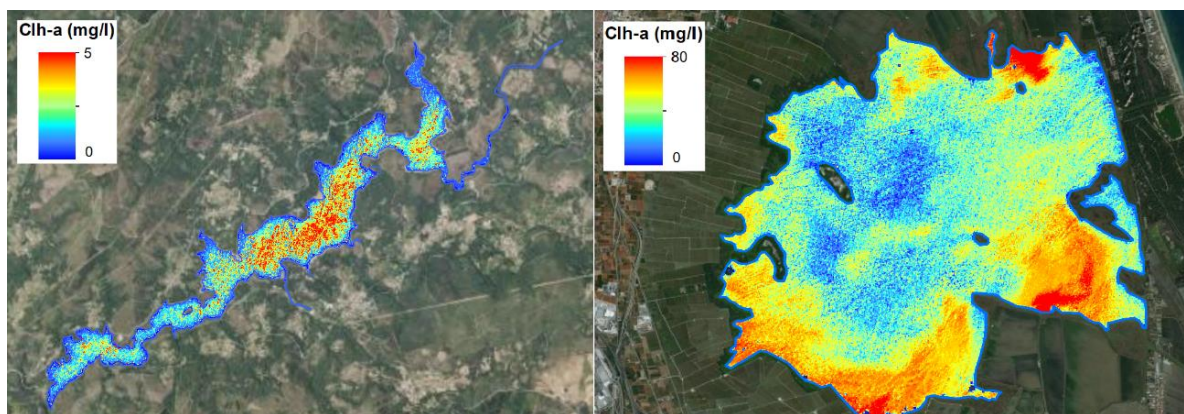


Figura 7. Imagen con la concentración de Clorofila-a en el embalse de As Conchas (izquierda) y en la Albufera de Valencia (derecha) en el mes de mayo de 2020.

Extracción de los datos de concentración de clorofila-a de las imágenes

Para cada uno de las localizaciones de las sondas de medida, se han extraído los valores de concentración de Clorofila-a obtenidos de las imágenes de satélite con los diferentes algoritmos descritos anteriormente para su evaluación. Para obtener un valor estadísticamente representativo de cada sonda, en cada localización se han obtenido los puntos situados a una distancia de 10 metros, de tal modo que el valor es una media de un área total de 400 m² (Figura 8).

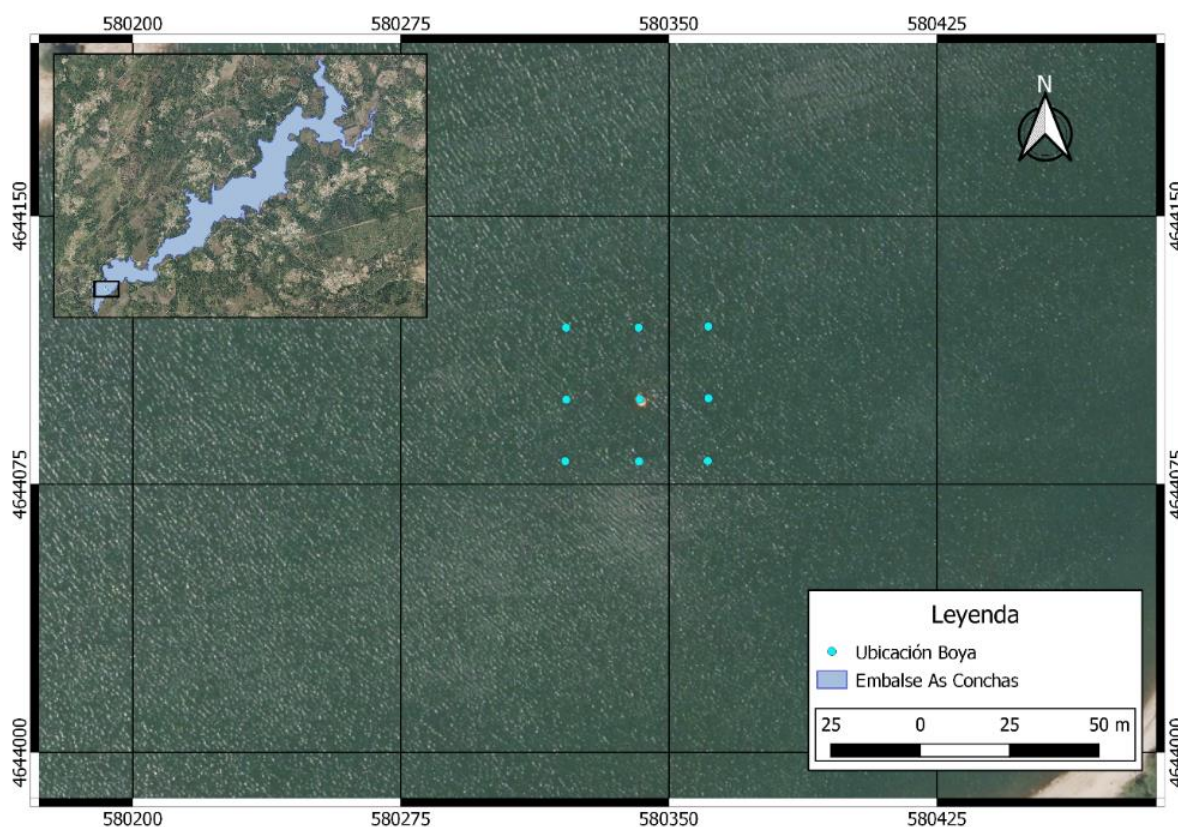


Figura 1 Mapa con localización de los puntos en el embalse de As Conchas, donde se han aplicado los diferentes índices.

3. Aplicación

3.1. Algoritmos de Clorofila Landsat 8

En la tabla A1 del Anexo se muestran los resultados en el embalse de As Conchas hallados para el índice de Shafique para las fechas de cada imagen y los valores de los parámetros disponibles de pH, temperatura y concentración de clorofila-a.

Los valores de concentración de clorofila-a que se han obtenido con el índice de Shafique, se encuentran entre 6,1 y 34 mg/m³, y la correlación entre las concentraciones de clorofila-a halladas y las reales, la correlación obtenida ha sido muy baja, siendo R²= 0,42. Las desviaciones de los valores obtenidos con el algoritmo con respecto a las medidas de las boyas no siguen un patrón o tendencia claros. Es decir, las diferencias entre las medidas de las boyas y las obtenidas con éste índice no dependen del rango de concentración de clorofila-a.

Sin embargo, al realizar la media anual este índice muestra una concentración media de 20,97 mg/m³, muy próxima a la real. Esto significa que para determinar concentraciones en fechas concretas no es muy fiable puesto que dependiendo del valor real éste se ajusta mejor o peor, pero para calcular la media anual sí es bastante eficiente.

En la figura 9 se muestra la correlación lineal existente entre los valores obtenidos y los valores reales medidos por la boya.

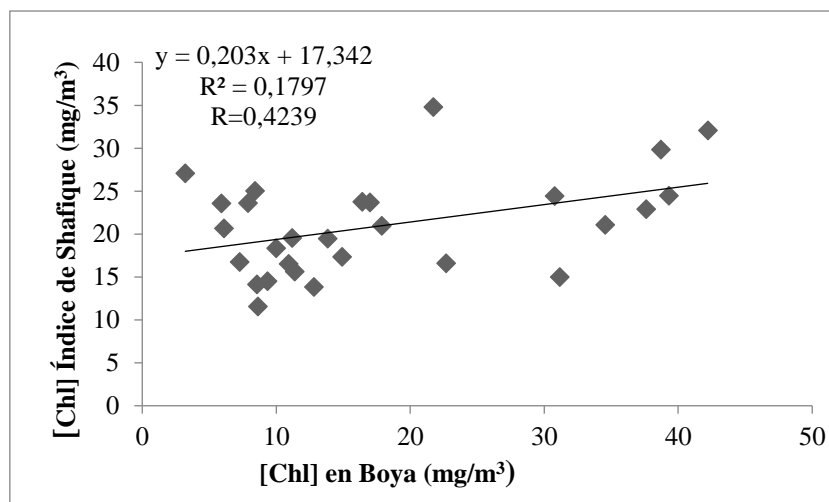


Figura 9. Valores de concentración de Chl-a calculados a partir del índice propuesto por Shafique frente a los valores medidos in situ por la boya

Para el Índice NDBI se obtiene una correlación de R²=0,4872. A lo largo de la serie de datos, los valores oscilan entre -0,26 y 0,15, por lo que se considera que a lo largo del año el embalse tiene las condiciones para la producción de HAB, ya que se entiende que las concentraciones de clorofila-a son altas. En los meses de abril a agosto (las temperaturas son mayores) los valores del índice son mayores a 0, lo que indica que serían épocas susceptibles de producirse floraciones de HAB en el embalse. También se observa que cuando se superan concentraciones de clorofila-a por encima de 30 mg/m³, los valores de éste índice muestran valores negativos y, por tanto, no es adecuado para determinar la existencia de HAB (Figura 10).

La baja correlación que se observa en la determinación de la concentración de clorofila-a mediante éstos índices, se debe a que las aguas continentales, espectralmente son complejas ya que los sedimentos producidos por la erosión cargan de materia orgánica y minerales las masas de agua e interactúan entre sí, lo que hacen más complicada la detección de pigmentos específicos. También

hay que tener en cuenta que las boyas se encuentran a cierta profundidad (aproximadamente 1 metro) mientras que los datos recogidos en las imágenes satelitales son los valores de reflectividad obtenidos en la superficie de la masa de agua, esto afecta puesto que la concentración de pigmentos en el agua no se encuentra dispersos de forma homogénea, sino que sus concentraciones varían también en función de la profundidad.

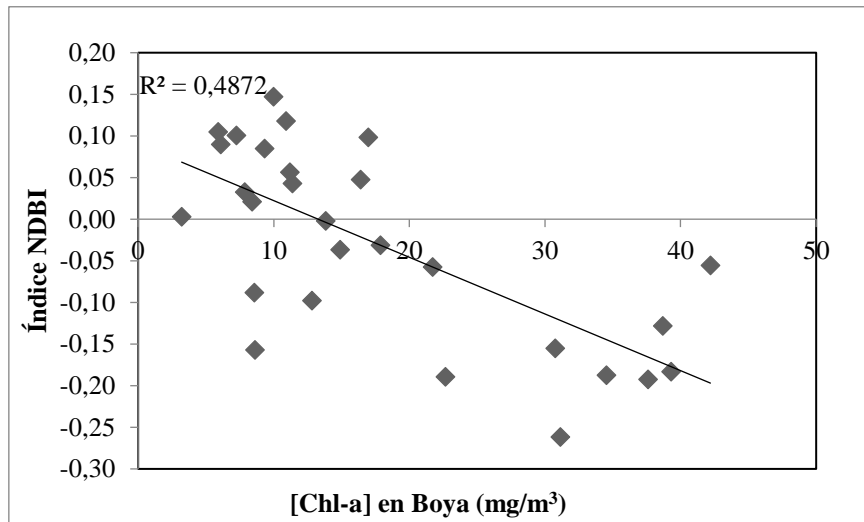


Figura 2 Valores del índice NDBI calculados a partir del índice propuesto por Domínguez frente a los valores medidos in situ por la boya.

3.2. Algoritmos de Clorofila Sentinel-2 (C2RCC).

Como se indicó en el apartado 2.4.1. para las imágenes de Sentinel-2, se ha aplicado el algoritmo C2RCC, implementado en el programa SNAP. En éste caso, se han analizado los resultados para cada uno de las dos masas de aguas: Albufera de Valencia y embalse de As Conchas. En la Tabla A2 del Anexo se dan los datos de las imágenes y parámetros medidos para la Albufera de Valencia. Allí, las sondas registraron datos de temperatura y concentración de clorofila-a. En la figura 11 se muestra la correlación lineal existente de la concentración de Clorofila-a calculada con el algoritmo C2RCC y los valores medidos in situ por las boyas de la Albufera.

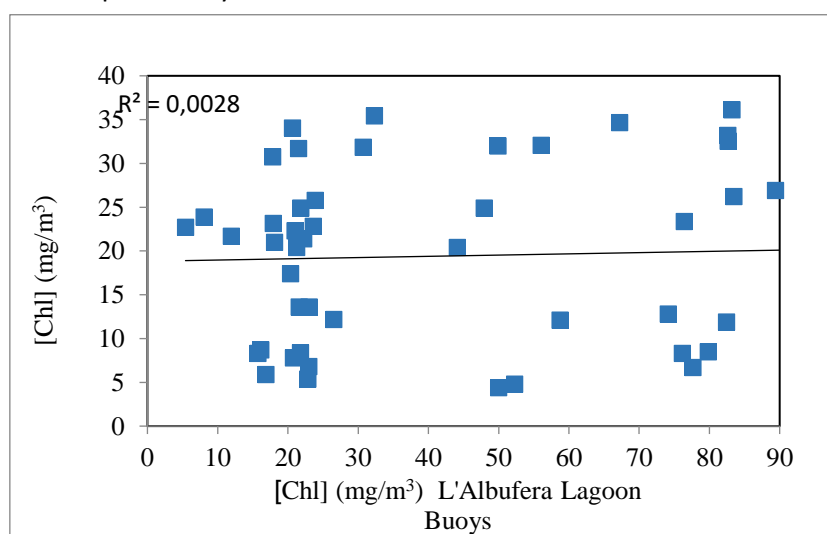


Figura 3 Valores de concentración de Chl-a calculados a partir del algoritmo C2RCC frente a los valores medidos in situ por las boyas en la Albufera de Valencia.

En la Tabla A3 del Anexo se muestran los datos de las imágenes y parámetros medidos para el embalse de As conchas. En éste caso, las sondas registraron datos de temperatura y concentración de clorofila-a. En la figura 12 se muestra la correlación lineal existente concentración de Clorofila-a calculados a partir del algoritmo C2RCC frente a los valores medidos in situ por las boyas en el embalse As Conchas.

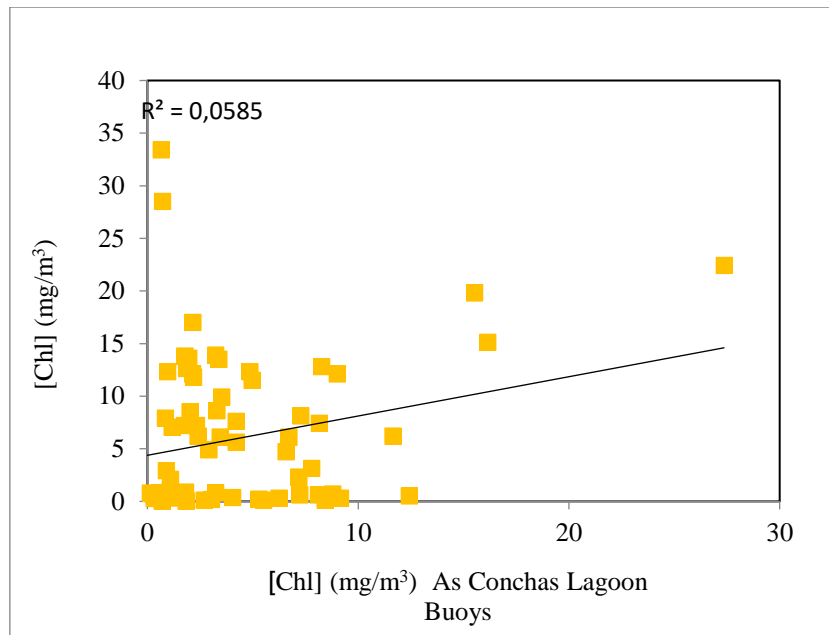


Figura 4 Valores de concentración de Chl-a calculados a partir del algoritmo C2RCC frente a los valores medidos in situ por las boyas en el embalse As Conchas.

En el caso del algoritmo C2RCC para la medida de concentración de Clorofila-a partir de imágenes Sentinel-2, los coeficientes de correlación, en ambos casos, es muy bajo: R^2 de 0,28 para el caso de la Albufera de Valencia y de 0,058 en el embalse de As Conchas. Las desviaciones entre las concentraciones medidas por las boyas y los valores obtenidos con el algoritmo C2RCC no presenta una pauta destacable, aunque en el caso del embalse de As Conchas, cuando la boya registra valores de concentraciones por encima de 15 mg/m^3 , la desviación del algoritmo es siempre positiva.

En el embalse de As Conchas, la correlación de las concentraciones de clorofila-a calculadas con el método de Shafique arroja valores más altos que con el algoritmo C2RCC, a pesar de que el primer método está desarrollado en una masa de agua con parámetros diferentes a nuestra masa de agua de estudio, mientras que el segundo método, está diseñado para un amplio rango de masas de aguas con diferentes parámetros.

3.3. Sistema de monitorización de la clorofila-a mediante imágenes de satélite.

Aunque ya hemos comprobado que, con la metodología aplicada, las medidas cuantitativas de la concentración de clorofila-a mediante imágenes de satélite no es todavía una opción operativa. Sin embargo, la monitorización del contenido en clorofila-a con imágenes de satélite, si permite tener una visión cualitativa de la distribución espacial y evolución temporal de las zonas y focos con mayor y menor concentración relativa de clorofila-a. En la figura 13 y figura 14 se muestra un mosaico para diferentes fechas en el embalse de As Conchas y la Albufera de Valencia.

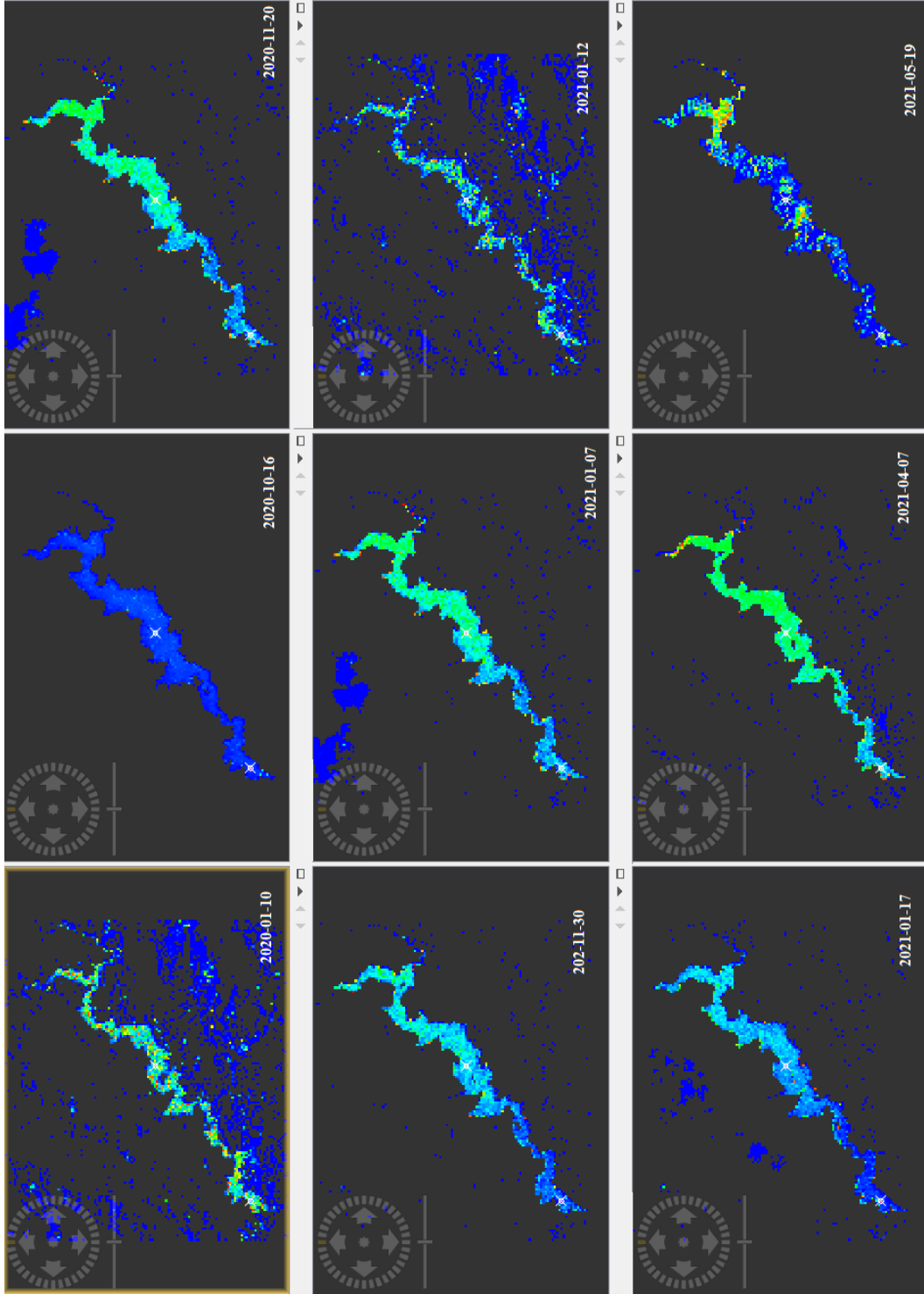


Figura 5 Mosaico de la concentración de Clorofila-a en el embalse de As Conchas calculados a partir de las imágenes de satélite.

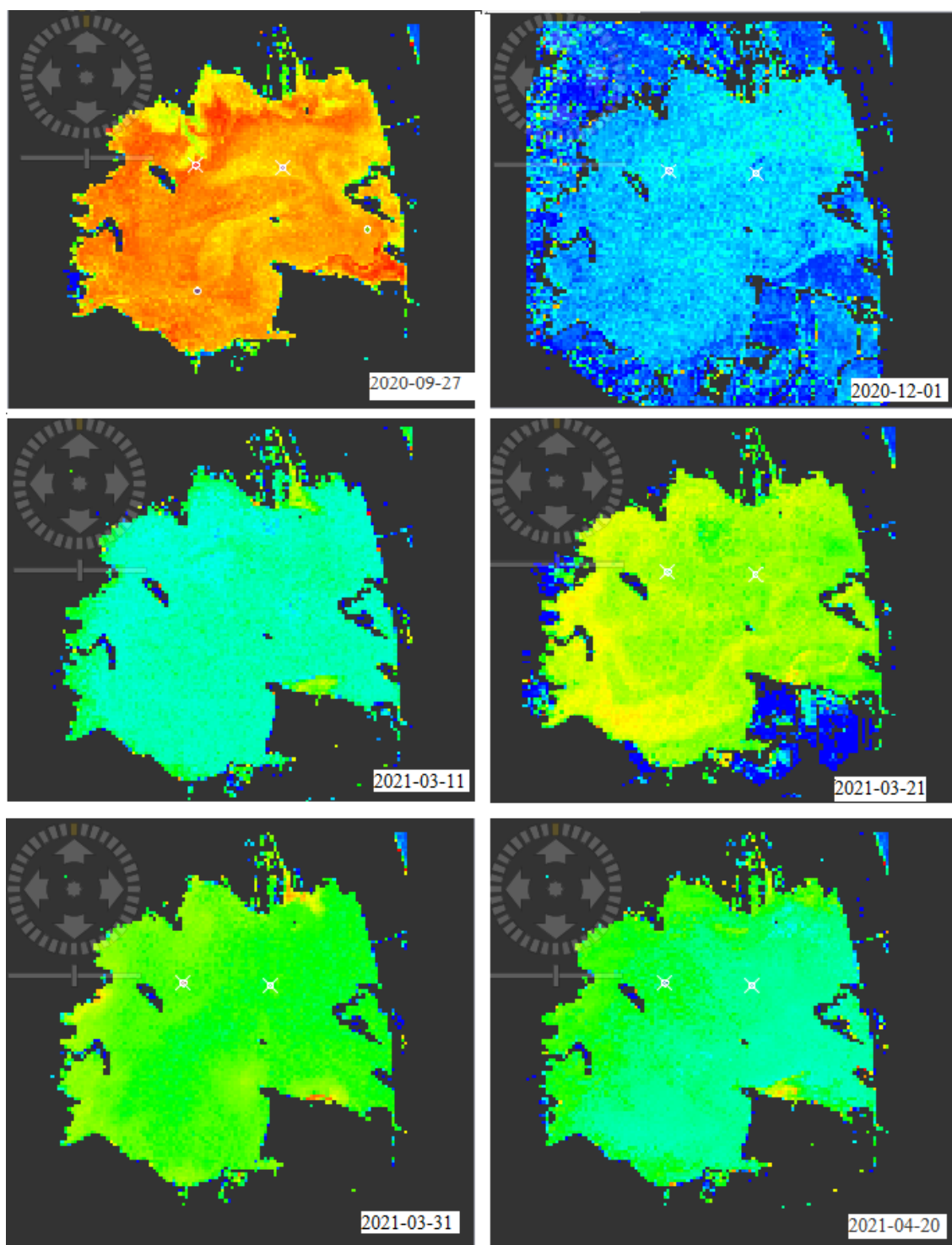


Figura 6 Mosaico de la concentración de Clorofila-a en la Albufera de Valencia calculados a partir de las imágenes de satélite.

ANEXO

Resultados obtenidos con los índices aplicados a las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2

Tabla A1: Resultados obtenidos con los índices de Shafique y NDBI para el embalse de As Conchas

<u>Fecha</u>	<u>pH</u>	<u>T °C</u>	<u>Boya [Chl] (mg/m3)</u>	<u>Shafique [Chl] (mg/m3)</u>	<u>NDBI</u>
28/01/2018	7,1	7,9	12,8	13,8	-0,10
30/01/2018	7,2	7,9	13,8	19,5	0,00
22/02/2018	7,2	7,7	14,9	17,3	-0,04
24/02/2018	7,3	7,7	11,2	19,5	0,06
18/04/2018	7,1	10,9	10,9	16,5	0,12
23/04/2018	7,6	14,5	16,4	23,7	0,05
25/04/2018	7,6	16,7	11,4	15,6	0,04
10/05/2018	8.32	16,7	17,0	23,7	0,10
15/05/2018	7,6	15,0	10,0	18,4	0,15
20/05/2018	7,4	18,1	6,1	20,7	0,09
14/06/2018	7,3	18,2	7,3	16,7	0,10
17/06/2018	7,8	20,5	9,3	14,5	0,08
19/06/2018	8,9	21,9	7,9	23,6	0,03
09/07/2018	8,9	23,5	3,2	27,1	0,00
01/08/2018	8,5	23,1	5,9	23,6	0,11
16/08/2018	9,6	23,8	8,4	25,0	0,02
23/08/2018	10,1	24,5	21,7	34,8	-0,06
10/09/2018	10,0	22,4	42,2	32,1	-0,06
12/09/2018	10,0	22,7	39,3	24,5	-0,18
15/09/2018	10,0	22,6	38,7	29,8	-0,13
22/09/2018	9,9	21,8	37,6	22,9	-0,19
25/09/2018	10,0	22,1	34,5	21,1	-0,19
30/09/2018	9,8	21,4	31,2	15,0	-0,26
02/10/2018	9,6	20,9	30,8	24,4	-0,16
05/10/2018	9,2	20,2	22,7	16,6	-0,19
10/10/2018	7,3	18,7	8,6	11,6	-0,16
26/12/2018	6,9	8,9	8,6	14,1	-0,09
03/05/2019	-		s.d.	13,4	-
13/05/2019	-	25,0	s.d.	19,3	-
28/05/2019	-	24,3	s.d.	15,6	-
30/05/2019	-	25,1	1,6	14,3	-
02/07/2019	-	25,7	8,3	13,0	-
19/07/2019	-	25,6	2,8	11,6	-
22/07/2019	-	26,1	2,9	20,4	-
01/08/2019	-	25,8	3,5	15,7	-
13/08/2019	-	25,1	6,1	11,8	-
21/08/2019	-	25,6	8,8	18,5	-
31/08/2019	-	25,3	4,2	14,6	-
02/09/2019	-	22,1	8,5	17,5	-
07/09/2019	-	22,7	2,4	18,3	-
12/09/2019	-	10,9	2,2	6,1	-
15/09/2019	-	11,3	3,3	24,0	-
10/03/2020	-	11,0	7,9	15,6	-
18/03/2020	-	11,3	4,7	23,3	-
23/03/2020	-	12,3	12,7	10,7	-
28/03/2020	-	13,0	14,6	21,7	-
17/05/2020	-	14,4	3,6	8,6	-
19/05/2020	-	17,5	3,5	13,0	-
24/05/2020	-	20,0	7,9	16,8	-
27/05/2020	-	22,4	6,3	13,6	-

Tabla A2. Resultados obtenidos de las medidas de concentraciones de clorofila-a con el algoritmo C2RCC para la Albufera de Valencia con imágenes de Sentinel-2

Lugar	Boya	Fecha	Temperatura °C	Boya [Chl] (mg/m³)	C2RCC [Chl] (mg/m³)
Albufera	YSI-A1	11/03/2020	15,4	26,5	12,2
Albufera	YSI-B2	11/03/2020	15,8	58,7	12,1
Albufera	YSI-A1	10/05/2020	22,4	21,8	24,9
Albufera	YSI-B2	10/05/2020	22,8	83,5	26,2
Albufera	YSI-A1	20/05/2020	25,6	21,0	22,3
Albufera	YSI-B2	20/05/2020	25,1	76,4	23,4
Albufera	YSI-A1	30/05/2020	25,8	18,1	21,0
Albufera	YSI-B2	30/05/2020	25,6	89,4	26,9
Albufera	YSI-A1	09/06/2020	24,2	23,6	22,8
Albufera	YSI-B2	09/06/2020	23,9	47,9	24,9
Albufera	YSI-A1	04/07/2020	28,8	30,7	31,9
Albufera	YSI-B2	04/07/2020	29,0	56,0	32,1
Albufera	YSI-A1	19/07/2020	29,3	21,5	31,7
Albufera	YSI-B2	19/07/2020	29,5	67,2	34,7
Albufera	YSI-A1	24/07/2020	28,2	17,8	30,8
Albufera	YSI-B2	24/07/2020	27,9	82,7	32,5
Albufera	YSI-A1	08/08/2020	29,1	20,6	34,1
Albufera	YSI-B2	08/08/2020	29,2	82,6	33,2
Albufera	YSI-A1	13/08/2020	29,3	32,3	35,4
Albufera	YSI-B2	13/08/2020	28,9	83,2	36,1
Albufera	YSI-A1	27/09/2020	19,4	49,9	32,0
Albufera	YSI-B2	27/09/2020	19,8	197,9	28,7
Albufera	YSI-A1	12/10/2020	18,5	8,1	23,9
Albufera	YSI-B2	12/10/2020	19,4	23,9	25,8
Albufera	YSI-A1	17/10/2020	16,8	5,4	22,7
Albufera	YSI-B2	17/10/2020	16,8	17,9	23,2
Albufera	YSI-A1	01/11/2020	18,3	11,9	21,7
Albufera	YSI-B2	01/11/2020	18,5	44,1	20,4
Albufera	YSI-A1	11/11/2020	17,3	16,9	5,9
Albufera	YSI-B2	11/11/2020	17,4	52,3	4,8
Albufera	YSI-A1	21/11/2020	18,0	16,1	8,7
Albufera	YSI-B2	21/11/2020	16,8	74,1	12,8
Albufera	YSI-A1	01/12/2020	13,9	15,7	8,3
Albufera	YSI-B2	01/12/2020	13,9	50,0	4,4
Albufera	YSI-A1	06/12/2020	8,3	23,0	6,8
Albufera	YSI-B2	06/12/2020	8,3	77,6	6,7
Albufera	YSI-A1	16/12/2020	11,8	21,8	8,4
Albufera	YSI-B2	16/12/2020	12,0	79,8	8,5
Albufera	YSI-A1	26/12/2020	9,5	22,8	5,4
Albufera	YSI-B2	26/12/2020	9,5	82,4	11,9
Albufera	YSI-A1	31/12/2020	6,8	23,0	13,6
Albufera	YSI-B2	31/12/2020	7,2	94,7	9,1
Albufera	YSI-A1	05/01/2021	5,4	20,8	7,8
Albufera	YSI-B2	05/01/2021	5,5	76,1	8,3
Albufera	YSI-A1	19/02/2021	13,8	21,6	13,6
Albufera	YSI-B2	19/02/2021	14,0	138,6	9,4
Albufera	YSI-A1	11/03/2021	14,4	20,4	17,4
Albufera	YSI-B2	11/03/2021	15,4	92,9	13,6
Albufera	YSI-A1	31/03/2021	18,3	22,2	21,4
Albufera	YSI-A1	20/04/2021	17,6	21,2	20,4

Tabla A3. Resultados obtenidos de las medidas de concentraciones de clorofila-a con el algoritmo C2RCC para el embalse de As Conchas con imágenes de Sentinel-2.

Lugar	Boya	Fecha	Temperatura °C	Boya [Chl] (mg/m³)	C2RCC [Chl] (mg/m³)
As conchas	YSI-Playa	10/03/2020	10,9	5,0	11,5
As conchas	YSI-Presa	10/03/2020	11,0	8,1	0,6
As conchas	YSI-Playa	13/03/2020	11,3	4,9	12,3
As conchas	YSI-Presa	13/03/2020	11,3	7,8	3,1
As conchas	YSI-Playa	23/03/2020	12,4	15,5	19,8
As conchas	YSI-Presa	23/03/2020	12,3	11,6	6,2
As conchas	YSI-Playa	28/03/2020	12,9	27,4	22,4
As conchas	YSI-Presa	28/03/2020	13,0	16,1	15,1
As conchas	YSI-Playa	14/04/2020	13,8	9,1	0,3
As conchas	YSI-Presa	14/04/2020	14,4	5,5	0,1
As conchas	YSI-Playa	19/04/2020	14,3	7,2	
As conchas	YSI-Playa	17/05/2020	17,3	6,7	6,1
As conchas	YSI-Presa	17/05/2020	17,5	3,5	9,9
As conchas	YSI-Playa	19/05/2020	18,9	5,8	
As conchas	YSI-Playa	22/05/2020	19,5	8,4	0,1
As conchas	YSI-Presa	22/05/2020	20,0	5,3	0,2
As conchas	YSI-Playa	24/05/2020	19,9	7,8	
As conchas	YSI-Playa	27/05/2020	22,4	9,0	12,1
As conchas	YSI-Presa	27/05/2020	22,4	8,3	12,8
As conchas	YSI-Playa	23/06/2020	21,7	3,2	0,8
As conchas	YSI-Presa	23/06/2020	21,8	1,8	0,9
As conchas	YSI-Playa	03/07/2020	22,1	12,4	0,5
As conchas	YSI-Playa	06/07/2020	24,0	4,2	7,6
As conchas	YSI-Presa	06/07/2020	24,0	4,2	5,6
As conchas	YSI-Playa	08/07/2020	24,6	0,7	0,0
As conchas	YSI-Presa	08/07/2020	25,0	1,8	0,0
As conchas	YSI-Playa	13/07/2020	24,9	0,8	0,5
As conchas	YSI-Presa	13/07/2020	25,0	1,5	0,7
As conchas	YSI-Playa	16/07/2020	24,1	7,3	8,1
As conchas	YSI-Presa	16/07/2020	24,3	8,2	7,4
As conchas	YSI-Playa	18/07/2020	24,9	7,2	0,6
As conchas	YSI-Presa	18/07/2020	25,1	8,8	0,7
As conchas	YSI-Playa	23/07/2020	25,2	-0,7	0,6
As conchas	YSI-Presa	23/07/2020	25,7	0,4	0,7
As conchas	YSI-Playa	26/07/2020	25,3	0,3	0,6
As conchas	YSI-Presa	26/07/2020	25,6	0,9	0,7
As conchas	YSI-Playa	28/07/2020	25,4	1,0	0,3
As conchas	YSI-Presa	28/07/2020	26,1	1,1	0,6
As conchas	YSI-Playa	31/07/2020	25,2	0,6	0,6
As conchas	YSI-Presa	31/07/2020	25,8	0,5	0,8
As conchas	YSI-Playa	05/08/2020	24,8	1,1	2,1
As conchas	YSI-Presa	05/08/2020	25,1	0,1	0,8
As conchas	YSI-Playa	07/08/2020	24,9	1,4	0,8
As conchas	YSI-Presa	07/08/2020	25,6	1,0	0,3
As conchas	YSI-Playa	10/08/2020	24,7	2,3	7,2
As conchas	YSI-Presa	10/08/2020	25,3	2,1	12,1
As conchas	YSI-Playa	22/08/2020	21,5	2,7	0,1
As conchas	YSI-Presa	22/08/2020	22,1	1,5	0,4
As conchas	YSI-Playa	25/08/2020	22,2	0,9	2,9
As conchas	YSI-Presa	25/08/2020	22,7	1,1	1,1
As conchas	YSI-Playa	09/10/2020	18,1	3,2	13,9
As conchas	YSI-Presa	09/10/2020	18,1	6,6	4,7
As conchas	YSI-Playa	11/10/2020	17,3	2,9	4,9
As conchas	YSI-Presa	11/10/2020	17,6	6,2	0,3

As conchas	YSI-Playa	16/10/2020	16,3	3,5	6,1
As conchas	YSI-Presa	16/10/2020	16,8	7,2	2,3
As conchas	YSI-Playa	10/11/2020	13,3	2,0	8,5
As conchas	YSI-Presa	10/11/2020	13,4	1,8	7,2
As conchas	YSI-Playa	13/11/2020	12,6	2,0	13,6
As conchas	YSI-Presa	13/11/2020	13,2	2,2	17,0
As conchas	YSI-Playa	20/11/2020	12,8	1,2	7,0
As conchas	YSI-Presa	20/11/2020	12,9	1,9	12,6
As conchas	YSI-Playa	28/11/2020	10,8	1,0	12,3
As conchas	YSI-Presa	28/11/2020	11,9	2,2	11,8
As conchas	YSI-Playa	30/11/2020	10,5	0,8	7,9
As conchas	YSI-Presa	30/11/2020	11,7	1,8	13,8
As conchas	YSI-Playa	07/01/2021	5,0	0,7	28,5
As conchas	YSI-Presa	07/01/2021	6,4	2,4	6,2
As conchas	YSI-Playa	09/01/2021	4,2	0,9	0,5
As conchas	YSI-Presa	09/01/2021	5,6	3,4	13,5
As conchas	YSI-Playa	12/01/2021	3,4	0,7	33,4
As conchas	YSI-Presa	12/01/2021	5,0	3,3	8,6
As conchas	YSI-Playa	07/04/2021	13,8	4,0	0,3
As conchas	YSI-Presa	07/04/2021	14,0	8,8	0,3
As conchas	YSI-Playa	19/05/2021	17,0	0,3	0,3
As conchas	YSI-Presa	19/05/2021	16,2	3,0	0,2

B. Estrategias integradas para la implementación de sistemas autónomos de mediciones constantes

B.1. Redes de sensores de medición continua de parámetros de calidad del agua relacionados con la potencial presencia de cianobacterias. El sistema de monitorización del proyecto CianoMOD

1. Justificación

El proyecto CianoMOD tiene como objetivo desarrollar un sistema capaz de estimar o predecir el estado de una masa de agua en la que se ha comprobado previamente, mediante un estudio en laboratorio, la presencia de cianobacterias

El interés por desarrollar un sistema con la capacidad de alerta temprana radica en reducir o mitigar algunos de los efectos adversos que un afloramiento masivo de cianobacterias (bloom) tiene sobre el medio natural y las actividades socio-económicas de la zona.

En las secciones previas se han expuesto algunos ejemplos de las posibles acciones a realizar para reducir el impacto negativo. Este apartado, Sistema de Monitorización que corresponde con la tarea "A4 – Redes de Sensores", expone los elementos usados en la monitorización remota de las masas de agua y los criterios empleados en la selección de los mismos.

Se describe primeramente una fase de estudio y análisis de la tecnología de redes de sensores donde se abordarán conceptos básicos sobre las mismas. En la fase de desarrollo se documenta las herramientas software y módulos hardware necesarios para conformar un canal de entrada de datos. Seguidamente se muestran las series temporales obtenidas mediante el canal de entrada de datos y finalmente conclusiones.

2. Procedimiento

El desarrollo metodológico realizado para la instalación y recogida continua de datos de calidad del agua y climáticos se ha realizado mediante un proceso secuencial de seis fases (figura 1). En ellas se contemplan desde los procedimientos seguidos para determinar las tecnologías existentes y su idoneidad para ser utilizadas en el proyecto CianoMOD (fase 1), el diseño completo del sistema de sensores, teniendo en cuenta las características específicas de su medición, y los soportes sobre los que se instalarán que permitan su perdurabilidad en las zonas donde se instalarán (fase 2), los criterios y procedimiento para su colocación directa en las masas de agua de interés (fase 3) y, finalmente, las características de recepción y registro de los datos que son medidos continuamente y enviados en remoto (fase 4).

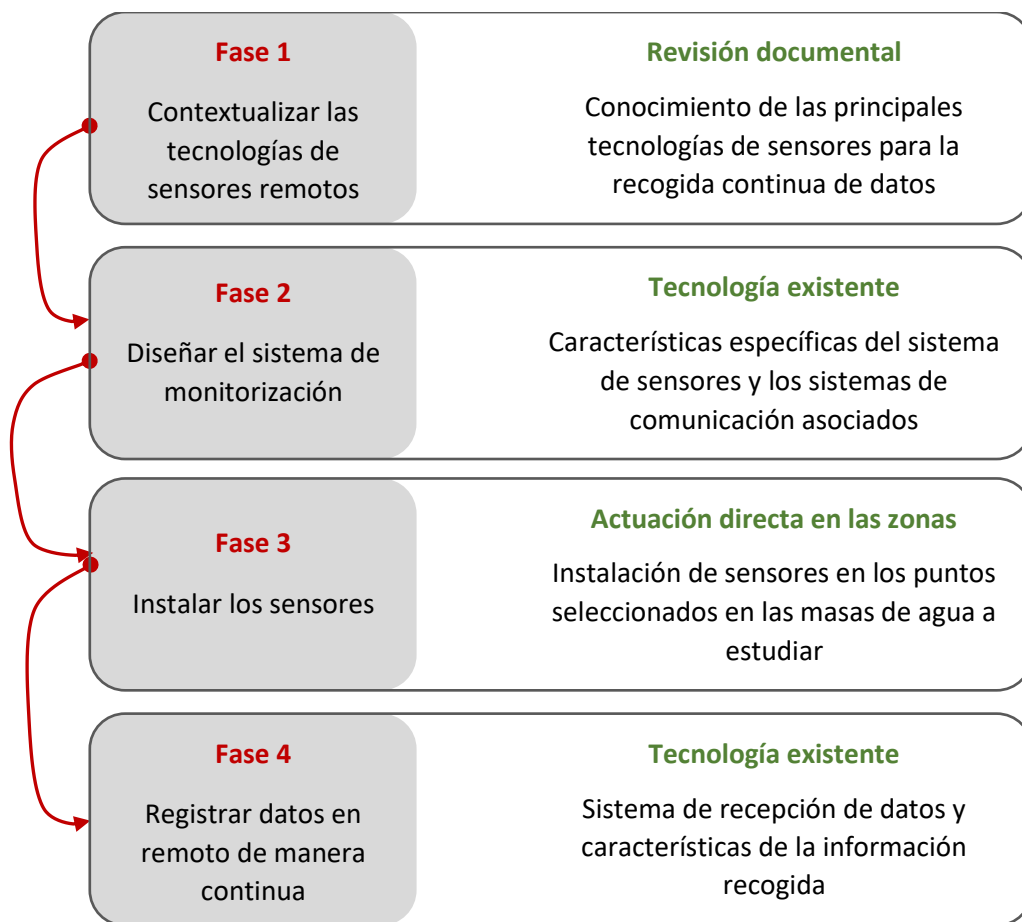


Figura 1. Fases del procedimiento seguido para la instalación del sistema de monitorización del proyecto CianoMOD. Izquierda: objetivo de la fase, derecha: resumen del procedimiento seguido.

2.1. Fase 1. Análisis de la tecnología de redes de sensores para el sistema de monitorización de masa de agua

Una red de sensores inalámbrica (Wireless Sensor Network - WSN), es un conjunto de pequeños dispositivos electrónicos que pueden medir alguna magnitud física de interés y transmitir dicha información a una estación base o hacia la nube.

Estos dispositivos electrónicos reciben el nombre de nodo o nodo-sensor y aunque su diseño hardware, el número y tipo de sensores conectados al nodo, así como la topología de la red pueden variar en función de la aplicación para la cual son desarrollados, los siguientes elementos son comunes en todos los nodos (figura 2):

- 1) un microcontrolador, para dotar al nodo de la capacidad de cómputo y toma de decisión,
- 2) un sistema de radio-comunicación para transmitir la información recolectada y
- 3) sensores para percibir el entorno que les rodea.

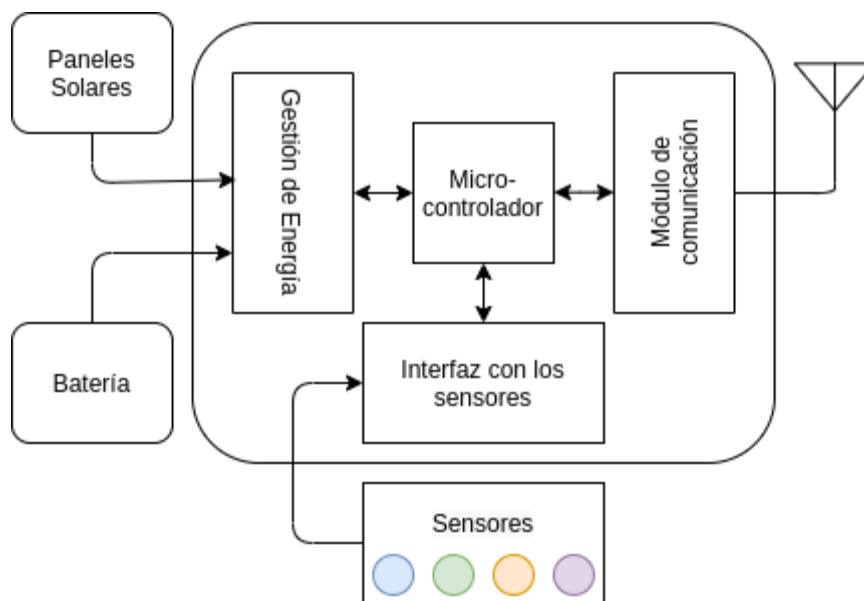


Figura 2. Diagrama de bloques con los componentes fundamentales de un nodo.

Los nodos pueden ser clasificados según su función dentro de la estructura de red como puerta de enlace (gateway), enrutadores (router) y dispositivo final. La puerta de enlace es un puente o interfaz entre dos protocolos distintos de comunicación. Normalmente, estos nodos tienen acceso a internet y son los encargados de enviar hacia el servidor central toda la información recopilada por la red. Los enrutadores comunican secciones de la red que están demasiado distantes como para comunicarse directamente con la puerta de enlace y por último están los dispositivos finales, estos nodos hacen uso de los anteriores para enviar los datos. La estructura o topología de la red es la forma en la que los nodos están comunicados. Y el número de formas posibles está determinado a su vez por el sistema o tecnología de comunicación empleado. Dentro de las posibles topologías se encuentran: punto a punto, estrella, malla y árbol (figura 3).

Debido a la naturaleza de las aplicaciones para las cuales son desarrollados los nodos, normalmente su explotación es sin conexión a la red eléctrica. Lo que implica el uso de baterías y una adecuada gestión de la energía. La energía que dispone un nodo es un parámetro relevante debido a que el tiempo que dura la batería indicará la vida media del nodo y, por tanto, el tiempo máximo entre mantenimientos o intervención humana.

Entre las estrategias para aumentar la autonomía se encuentran los sistemas de recolección de energía como paneles solares o generadores eólicos al mismo tiempo que son seleccionados componentes con

bajo consumo. Por otro lado, el medio donde se empleará la red de sensores inalámbrica y la topología de la red imponen restricciones a la hora de seleccionar el sistema de comunicación.

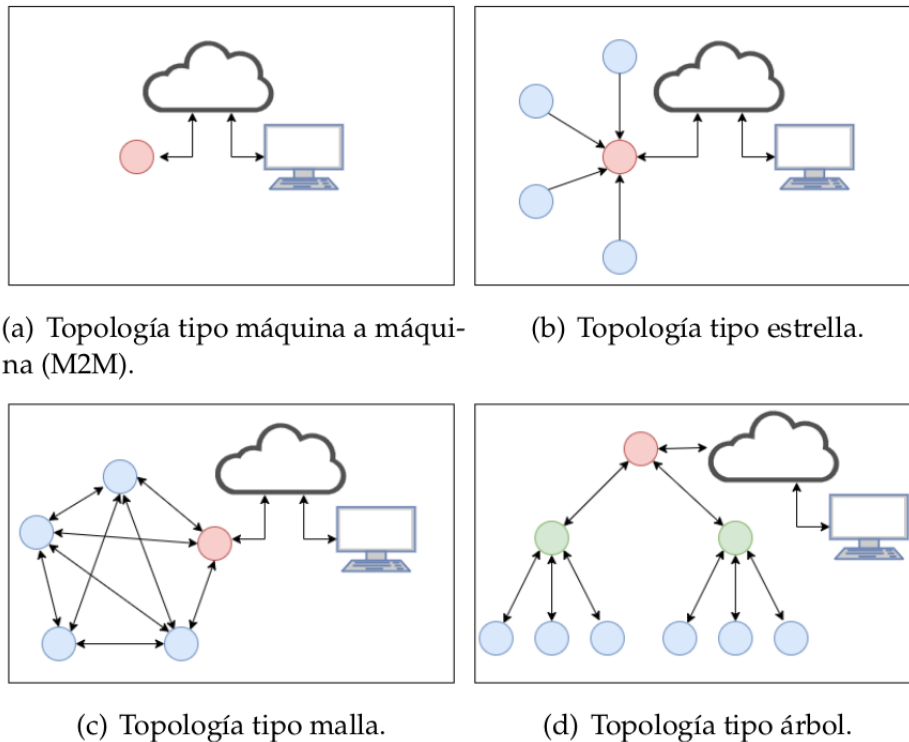


Figura 3. Ejemplos de topologías de redes. Puerta de enlace círculo rojo, enrutador círculo verde y dispositivo final círculo azul.

Si bien los orígenes de las WSN provienen del sector militar durante el desarrollo del sistema para vigilar la presencia de submarinos durante la Guerra Fría, "Sound Surveillance System (SOSUS)", el campo de aplicaciones de las WSN actualmente es amplio, abarca edificios inteligentes, agricultura de precisión, monitoreo ambiental y seguimiento de vehículos y animales, entre otros.

El caso que nos ocupa está enmarcado en el monitoreo ambiental y, más concretamente, en su uso en aguas continentales como los embalses y lagos. Para el estudio de una masa de agua es necesario recopilar datos relacionados con los parámetros físico-químicos de la misma entre los cuales se encuentran conductividad, potencial de oxidación-reducción, turbidez, temperatura, pH y concentración de pigmentos fotosintéticos tales como clorofila-a y la ficocianina.

Tradicionalmente, el muestreo se ha realizado de forma manual, desplazando un equipo técnico hasta la zona y recopilando muestras del agua para su posterior análisis en un laboratorio. El principal inconveniente de este método radica en que se tiene un periodo de muestro típico de semanas o meses y que para ciertos procesos naturales como el afloramiento masivo de cianobacterias puede no ser suficiente como para capturar la dinámica del fenómeno. Por otro lado, con las redes de sensores inalámbricas es posible implementar periodos de muestreos en ordenes de horas o minutos con la ventaja añadida de que envían los datos a un servidor central y estos pueden ser consultados prácticamente desde cualquier parte del mundo mediante Internet. Estas ventajas convierten a las WSN en una alternativa a valorar en situaciones donde se precisa de un periodo de muestreo menor al que un muestreo manual puede brindar y donde las zonas de interés distan del centro de control que realiza el estudio. Por estos motivos, CianoMOD implementa una red de sensores inalámbrica.

Si bien es cierto que implementar una WSN es una tarea con volumen de trabajo alto, a día de hoy existen compañías, que gracias al movimiento maker (Do It Yourself - DIY), software libre y hardware abierto, su modelo de negocio facilita el acceso a módulos hardware y/o software para su desarrollo

rápido y a costes reducido. No es objetivo de este documento realizar una exhaustiva revisión de las compañías existentes en el mercado, solo mencionaremos algunas que comercializan sus productos bajo una licencia de software libre y/o hardware abierto. Lo que permite al usuario final un alto grado de libertad a la hora de implementar una solución para un problema en particular. Entre estas compañías se encuentran:

1) Libelium Comunicaciones Distribuidas S L, fabrica una plataforma hardware nombrada Waspote que debido a su diseño modular posibilita seleccionar diversos tipos de comunicación inalámbrica, diversas placas de interfaz de sensores con una disponibilidad de alrededor de 120 sensores a la vez que brinda un conjunto de herramientas de desarrollo de software (Software Development Kit - SDK) y una interfaz de programación (Application Programming Interfaces - API) de código abierto.

2) Arduino es una plataforma de hardware abierto para la cual existen múltiples módulos de circuito impreso con diferentes tipos de sensores y actuadores, también proporciona un entorno de desarrollo integrado (Integrated Development Environment - IDE) de código abierto y cuenta con una amplia comunidad de soporte.

Por último, mencionar a 3) SparkFun Electronics y 4) Adafruit Industries. Estas últimas son compañías de hardware libre que también ofrecen diversos módulos para un rápido prototipado, además de proporcionar cursos y documentación para adquirir conocimientos básicos de electrónica, tecnología y programación. Las empresas antes mencionadas son un excelente punto de partida para implementar una red de sensores de bajo coste.

2.2. Fase 2. Diseño del sistema de monitorización de masas de agua utilizando tecnologías de redes de sensores

A continuación, describiremos los elementos empleado en el proyecto CianoMOD a la hora de implementar la red de sensores inalámbrica. Se relacionará los nodos usados, así como la estructura mínima necesaria para recopilar y almacenar los datos. El despliegue de los nodos se realizó en dos zonas: Embalse de As Conchas, Galicia y Albufera de Valencia, Valencia. El proyecto CianoMOD emplea dos marcas diferentes de nodos, estas son: YSI (marca de Xylem Analytics LLC) y Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. En la Figura 4 se observa la ubicación de las boyas dentro de cada masa de agua. A la izquierda se encuentra el embalse de As Concha, Galicia y a la derecha la Albufera de Valencia. En cada lugar de estudio se instalaron dos boyas de cada marca de nodo y una estación meteorológica.

Para la identificación de cada boya se optó por nombrarlas en función del tipo de nodo que portaba, por ejemplo, las boyas YSI se identifican mediante "Yx" donde "Y" es la inicial de la marca y "x" es un número consecutivo. En el caso de las boyas con nodos Libelium se nombraron "Lx", de forma análoga a YSI, "L" representa la marca del nodo y "x" es un número consecutivo único para cada boya o punto de muestreo.

2.2.1. Libelium

Como se comentó anteriormente, Libelium fabrica una plataforma hardware que debido a su diseño modular (Figura 5) posibilita seleccionar entre diversos tipos de comunicación inalámbrica y placas de interfaz con los sensores. Al mismo tiempo que brinda un conjunto de herramientas de desarrollo de software y una interfaz de programación de código abierto.

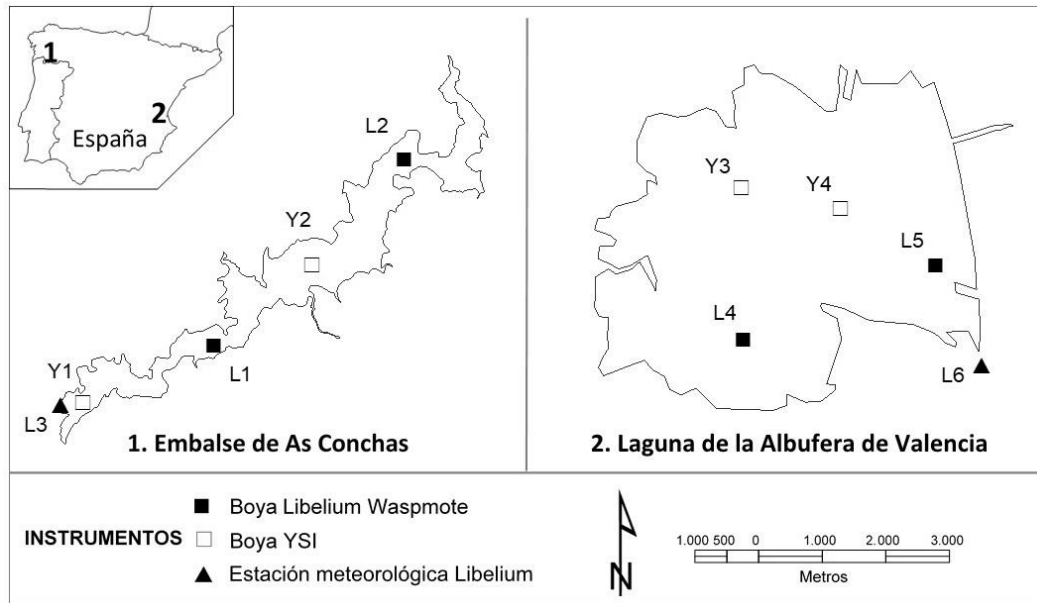


Figura 4. Ubicación de los nodos en ambas las masas de agua bajo estudio.

De Libelium se adquirieron los módulos hardware necesarios para conformar seis nodos, cuatro para registrar parámetros del agua y dos para registrar variables climáticas. Los nodos están constituidos por una placa principal (Waspnote), placa de interfaz con los sensores, módulo de comunicación, una tarjeta microSD, conectores BNC y U.FL, panel solar, batería y sensores (ver Figura 6).

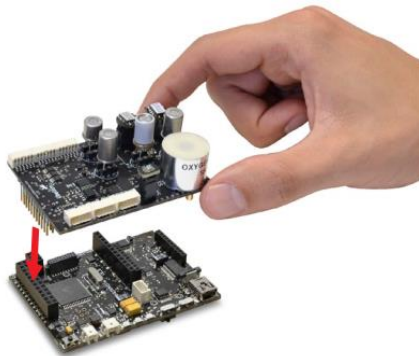


Figura 5. Ejemplo del diseño modular del hardware proporcionado por Libelium. Placa principal (Waspnote) en la parte inferior y placa de interfaz con los sensores en la parte superior. Imagen extraída de la documentación técnica del fabricante.



Figura 6. Componentes de un nodo de Libelium. En la parte superior izquierda se encuentra una caja estanca (IP65) seguida del panel solar. En el medio de la imagen de izquierda a derecha se encuentran: sensores, placa de interfaz con los sensores, Waspnote, módulo de comunicación y tarjeta microSD. En la parte inferior: cable USB mini-B para descargar el programa al nodo desde un ordenador, los conectores y las antenas.

2.2.1.1. Sensores

Los nodos con función de estación meteorológica emplean la tarjeta de interfaz Agriculture PRO. Esta tarjeta posibilita que la Waspnote adquiera los datos provenientes de la estación meteorológica WS-

3000: precipitación, velocidad y dirección del viento. Otro sensor empleado también en Agriculture PRO es el de radiación fotosintéticamente activa (PAR).

Por otro lado, los nodos destinados a monitorizar los parámetros del agua emplean la tarjeta Smart-Water la cual posibilita incorporar los siguientes sensores: pH, conductividad, temperatura, potencial de oxidación-reducción (ORP) y oxígeno disuelto (DO).

2.2.1.2. Sistema de comunicación

Para escoger la tecnología de comunicación se plantearon las siguientes restricciones: la frecuencia debe estar permitido su uso en la Unión Europea y el rango de alcance mínimo debería ser de al menos la mitad de la mayor longitud de las masas de agua bajo estudio, quedando fijado 5 km debido a que de extremo a extremo el embalse de As Concha mide alrededor de 9 km. Las tecnologías de comunicación para las cuales Libelium ofrece módulos y que cumplen con las restricciones antes mencionadas son resumidas en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los módulos Libelium según las restricciones establecidas para su utilización.

Módulo de Comunicación	Necesidad de Gateway	Velocidad Transmisión Subida de Datos
LoRa	Si	-
Sigfox EU	No	100 bps
GPRS	No	85.6 kbps
3G	No	384 kbps
4G	No	50 Mbps
NB-IoT / Cat-M	No	70 kbp / 375 kbps

Si bien es cierto que tanto LoRa, Sigfox, NB-IoT y Cat-M son sistemas de comunicación que usan redes de área amplia y baja potencia (Low Power Wide Area Network - LPWAN) diseñadas específicamente para comunicar dispositivos alimentados por batería, el módulo de comunicación seleccionado para los nodos Libelium fue el 4G. El principal motivo de esta elección es el bajo número de nodos Libelium a desplegar en cada zona de estudio, tres en total, dos para monitorizar parámetros del agua y una estación meteorológica. Al emplear los módulos 4G cada nodo tiene la posibilidad de comunicarse directamente con el servidor central (M2M) mediante solicitudes HTTP. Esta elección tiene las siguientes ventajas, en primer lugar, la red es más robusta debido a que cada nodo tiene comunicación independiente del resto y esto brinda la posibilidad que cada nodo continúe enviando datos, aunque algún otro nodo presente problemas. Otro punto a favor es la tasa de velocidad que ofrece el módulo 4G que, unido a la posibilidad de que la Waspote permite instalar hasta dos módulos de comunicación, puede convertirse en puerta de enlace si es preciso escalar el sistema. Por último y no menos importante es la facilidad de la configuración inicial. Por contra, es el módulo de comunicación más caro dentro de los que brinda Libelium, sin embargo, mientras el número de nodos totales a implementar sea bajo, continúa siendo una alternativa viable.

2.2.1.3. Formato de los datos a recibir (Data frame)

La API de Libelium provee un objeto frame que se encarga de empaquetar todos los datos recopilados por el nodo en una cadena hexadecimal con una estructura conocida. Este paquete de datos es conocido como Data Frame y está compuesto por dos partes fundamentales: el encabezado (header) y los datos (payload). Ver tabla 2.

El encabezado contiene información general relevante como el número identificativo del nodo (ID), que puede ser empleado como llave de acceso para proceder a guardar los datos contenido en el frame. Si el ID no está registrado previamente en la base de datos, el frame es descartado. Otro campo

relevante contenido en la cabecera es un contador secuencial de 0 a 255, este campo es incrementado por el nodo cada vez que realiza un envío de un frame y se puede emplear para implementar una alerta de pérdida de datos si se detecta un incremento mayor a la unidad.

Por otro lado, la carga útil del frame está constituida por los datos y sus respectivos códigos de identificación. Por ejemplo, para enviar 17,51 o C primero se agrega el código del sensor (134, 0x86 en hexadecimal) y luego los cuatro bytes del valor medido representado en el estándar IEEE-754 para números de 32 bits en coma flotante (0x418c147b). Quedando representado el parámetro de la temperatura dentro de la carga útil como 0x86418c147b.

Tabla 2. Formato de los datos enviado por los nodos Libelium (Extraída de la documentación oficial de Libelium).

HEADER							PAYLOAD								
<=>	0x00	0x17	0x74F94515	NODE_001	#	0x00	ID	Byte 1	Byte 2	ID	Byte 1	Byte 2	ID	Byte 1	Byte 2
A	B	C	E	F	D	G	Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3				

2.2.1.4. Algoritmo a implementar en el nodo

Los nodos deben trabajar de manera desatendida el mayor tiempo posible, a diferencia de otros dispositivos electrónicos, el software que se ejecuta en el nodo no está pensado para interactuar con un humano. Un diagrama de flujo básico de las funciones a realizar por el nodo es mostrado en la figura 7. Está compuesto por un ciclo infinito en el cual la Wasp mote comienza leyendo los datos desde la Smart-Water (o Agriculture PRO), compone un frame con los datos adquiridos y los envía mediante el módulo de comunicación hacia el servidor, por último, entra en un modo de bajo consumo o ahorro de energía hasta el próximo tiempo de muestreo.

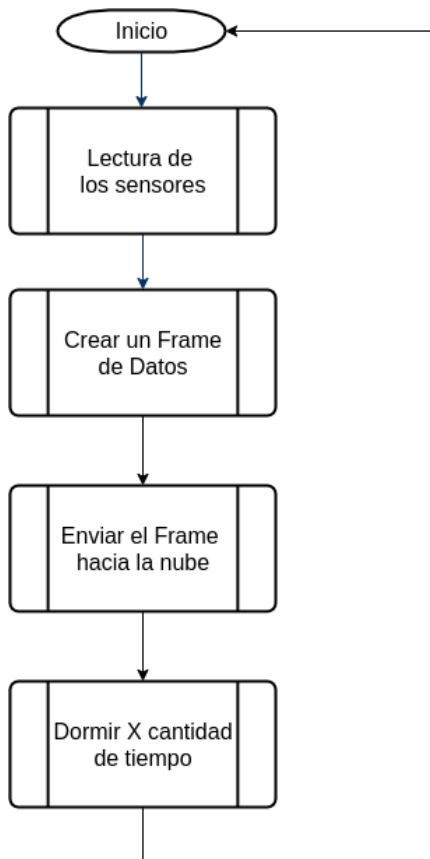


Figura 7. Diagrama de flujo general del programa que es ejecutado por un nodo.

El ejemplo anterior es sencillo, pero recoge las principales tareas a ejecutar en el nodo. A este se le pueden agregar algunas otras como el pre-procesado de los datos, comprobación de recepción del frame por parte del servidor central o un watchdog. Este último es un temporizador que se debe inicializar antes que se agote el tiempo configurado, en caso contrario provoca un reinicio de todo el nodo. Se emplea para evitar que el nodo quede atrapado en algún proceso o estado de manera indeterminada.

2.2.2. YSI

YSI es una empresa con una larga experiencia en el desarrollo de sistemas para la monitorización de la calidad del agua y ofrece, dentro de su catálogo, varios productos que, si se cuenta con los recursos económicos necesarios, es posible adquirir todos los componentes para monitorizar a remoto.

Dentro de los elementos fundamentales disponibles en este fabricante se encuentran:

1. Sensores y patrones de calibración.
2. Sonda multiparamétrica EXO-3, interactúa con los sensores y realiza las medidas.
3. Datalogger Storm-3, transmite los datos adquiridos por la sonda hacia la nube o servidor.
4. Servicio en la nube, se encarga de almacenar los datos en una base de datos (BBDD) y de su visualización mediante una página web.
5. Boya, necesaria para ubicar los sensores en el punto de interés dentro de la masa de agua.

La Fundación IMDEA-Agua adquirió cuatro nodos YSI previo al inicio del proyecto CianoMOD. Cada nodo está constituido por una sonda multiparamétrica EXO-3, un datalogger Storm-3, cable de comunicación entre la sonda y el datalogger y un sistema de alimentación que incluye una batería recargable, cargador y paneles solares. Dos de estos nodos fueron integrados en boyas proporcionadas por el propio fabricante (figura 8) e instaladas en el embalse de As Conchas (Ourense).



Figura 8. Boya del fabricante YSI instalada en el embalse de As Conchas (Ourense).

En el marco del proyecto CianoMOD, fue necesario diseñar una boya para albergar los nodos restantes de YSI. El datalogger, la batería y el cargador solar se ensamblaron dentro de un maletín resistente al agua (figura 9) y este, a su vez, era protegido por la parte superior de la boya desarrollada en la Fundación IMDEA-Agua.

La principal ventaja de este sistema radica en que la configuración y puesta a punto es transparente para el usuario, por lo que la curva de aprendizaje necesaria para su explotación es mínima. Por contra se encuentra el precio, el costo de instalación y mantenimiento del sistema YSI puede suponer un

esfuerzo económico importante si se desea monitorizar varias masas de agua o si por las dimensiones de una masa en particular fuese necesario instalar varias boyas.



Figura 9. Sonda multiparamétrica EXO-3, datalogger Storm-3, cable de comunicación, batería y maletín hermético.

2.2.2.1. Sensores

Actualmente, YSI cuenta con varias versiones de las sondas EXO, cuya principal diferencia es el número de puertos disponibles para la colocación de los sensores. Teniendo en cuenta el número de parámetros que se desearon monitorizar, se eligió la sonda multiparamétrica EXO-3, que posee 5 puertos disponibles para los siguientes sensores: temperatura y conductividad, pH, nitratos, clorofila total y ficocianina, y un último puerto utilizado para la colocación de un cepillo central de limpieza.

2.2.2.2. Sistema de comunicación

El módulo de comunicación que ofrece el datalogger Storm-3 (figura 10) es el sistema global para las comunicaciones móviles (del inglés Global System for Mobile communications, abreviado como GSM). En este caso, no es posible modificar o emplear otra tecnología de comunicación.

Dispone de cuatro canales de entrada analógicos y cuatro canales de entrada/salida digital. Soporta los siguientes protocolos de comunicación por cable: RS-232, RS-485 y SDI-12. El protocolo SDI-12 es el empleado en la comunicación entre la sonda multiparamétrica EXO-3 y el datalogger. Además, es capaz de crear una red local mediante WiFi a la cual se conecta un ordenador para configurar los parámetros del datalogger mediante una interfaz de usuario. Dentro de las opciones a configurar se encuentran: agregar/eliminar un sensor, establecer el periodo de muestreo y de envío de dato e IP de destino de los datos, entre otros.

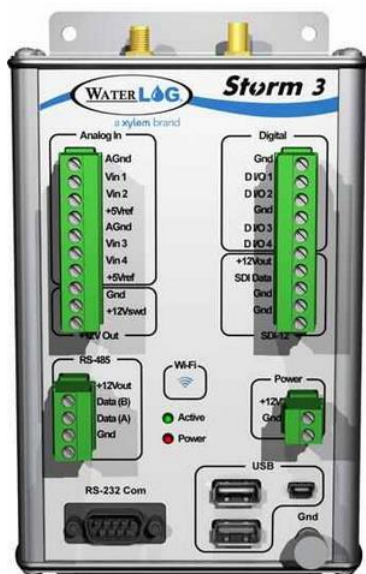


Figura 10. Datalogger Storm-3.

2.2.2.3. Formato de los datos a recibir

El datalogger Storm-3 envía los datos leídos por la sonda multiparamétrica EXO-3 mediante el formato XML.

2.2.3. Registro de los datos

El registro de los datos proveniente de los nodos es realizado en un servidor propio de la Fundación IMDEA-Agua. Si bien es cierto que existen plataformas disponibles en internet como ThingsBoard, Thinger.io o Amazon entre otros, el equipo de desarrollo del proyecto CianoMOD decidió crear su propia nube. El desarrollo de la nube se divide en dos fases, una primera está relacionada con la infraestructura y software que brindan soporte para la adquisición de los datos (canal de entrada) y otra fase donde se diseña todo lo relacionado con la visualización y procesamiento de los datos (canal de salida). A continuación, se exponen los elementos empleados en el canal de entrada de datos.

Para ello se instaló un servidor HTTP Apache, un intérprete PHP con la finalidad de implementar la lógica de recepción de los datos y un gestor de base de datos MariaDB. Todo el software empleado es libre, por lo que los programas no requieren del pago de una licencia.

Una base de datos relacional es un tipo de base de datos que almacena y proporciona acceso a datos relacionados entre sí. Su estructura está compuesta por tablas donde cada fila contiene es un registro con una ID única, llamada clave. El diseño de una base de datos consiste en definir las tablas y las relaciones entre ellas. En la Figura 11 se observan las cuatro tablas que componen el núcleo de la base de datos empleada en el proyecto CianoMOD.

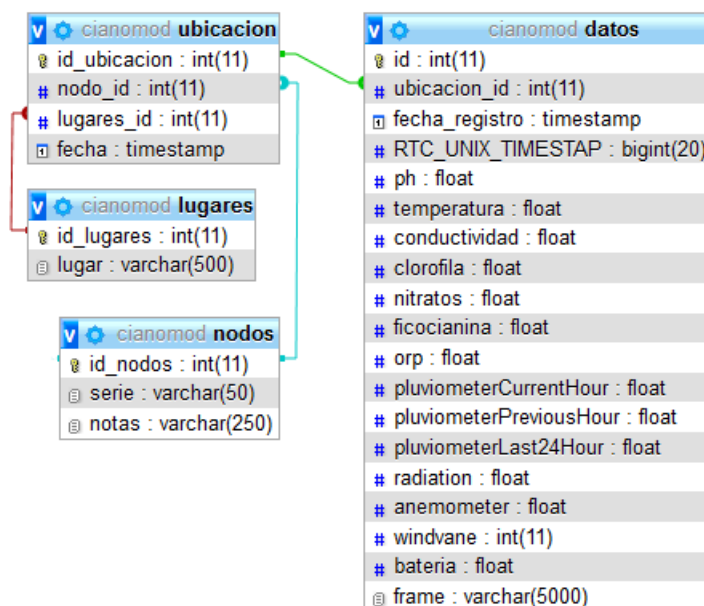


Figura 11. Tablas que componen el núcleo de la base de datos diseñada para el proyecto CianoMOD.

A pesar de no ser todas las tablas que componen la base de datos, si son las que realizan las funcionalidades principales: registro de los datos y la trazabilidad de los mismos. La tabla “datos” contiene una columna (atributo) por cada parámetro a registrar, más un número incremental único por fila (clave), la fecha de registro o marca temporal y una columna en la que se registra la ubicación actual del nodo que envía los datos.

Como marca temporal (Unix Time Stamp) se guarda el número entero de segundos transcurrido desde el 1 de enero de 1970. Por otro lado, las tablas lugares y nodos son tablas maestras. En la primera se registra los puntos de muestreo donde pueden estar colocados los nodos y en la segunda la información propia de los nodos como su número de identificación. La tabla “ubicación” registra la

ubicación de cada nodo, lo que posibilita saber dentro del conjunto de datos cuales corresponden con cada lugar de muestreo y qué nodo los recopiló.

2.2.4. Sistema de flotación. Boya

Se diseñó una boya (ver Figura 12) que permitiera ubicar el nodo en el punto de interés dentro de la masa de agua. Debido a que se contaba con nodos de diferentes fabricantes, se diseñaron dos boyas: una para el nodo de YSI y otra para el nodo de Libelium. Las boyas están compuestas por dos partes o secciones, la parte inferior o flotador y la parte superior o caseta. En la figura 13 se muestra las pruebas iniciales realizadas en la Fundación IMDEA-Agua con los dos tipos de boyas. Ambas comparten el mismo flotador cuyas características son: cuerpo cilíndrico de 700 mm de diámetro, 300 mm altura, cerrado herméticamente y relleno de poliuretano.

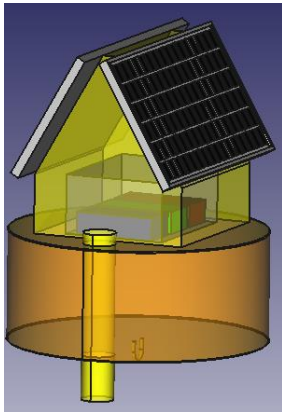


Figura 12. Diseño de la boya para los nodos YSI en FreeCAD.



(a) Pruebas iniciales de boya para los nodos Libelium



(b) Ensamblado de la boya con el nodo Ysi



(c) Pruebas iniciales de boya para los nodos Ysi

Figura 13. Etapas en el diseño y validación de la boya.

Debido a la baja profundidad de la Albufera de Valencia, fue necesario incluir un contrapeso interno en los flotadores de las boyas. Está constituido por una capa de hormigón de aproximadamente 40 mm de altura y de la misma área de la base del cilindro. La masa del contrapeso es de aproximadamente 30 kg. La figura 14 muestra un flotador antes de ser rellenado con poliuretano.



Figura 14. Contrapeso interno de los flotadores a emplear en la Albufera de Valencia.

La parte superior de la boya para los nodos Libelium es un cuerpo cúbico de cuatro lados verticales de 320x500 mm, fijado en ocho puntos a la base. Para el caso de los nodos YSI la parte superior fue modificada para insertar con un ángulo de 150° los paneles solares (figura 15).

Tanto el flotador como la parte superior fueron construidos en fibra de vidrio. El color seleccionado fue el amarillo para aumentar su visibilidad y evitar accidentes con las embarcaciones que pudieran circular por las masas de agua.

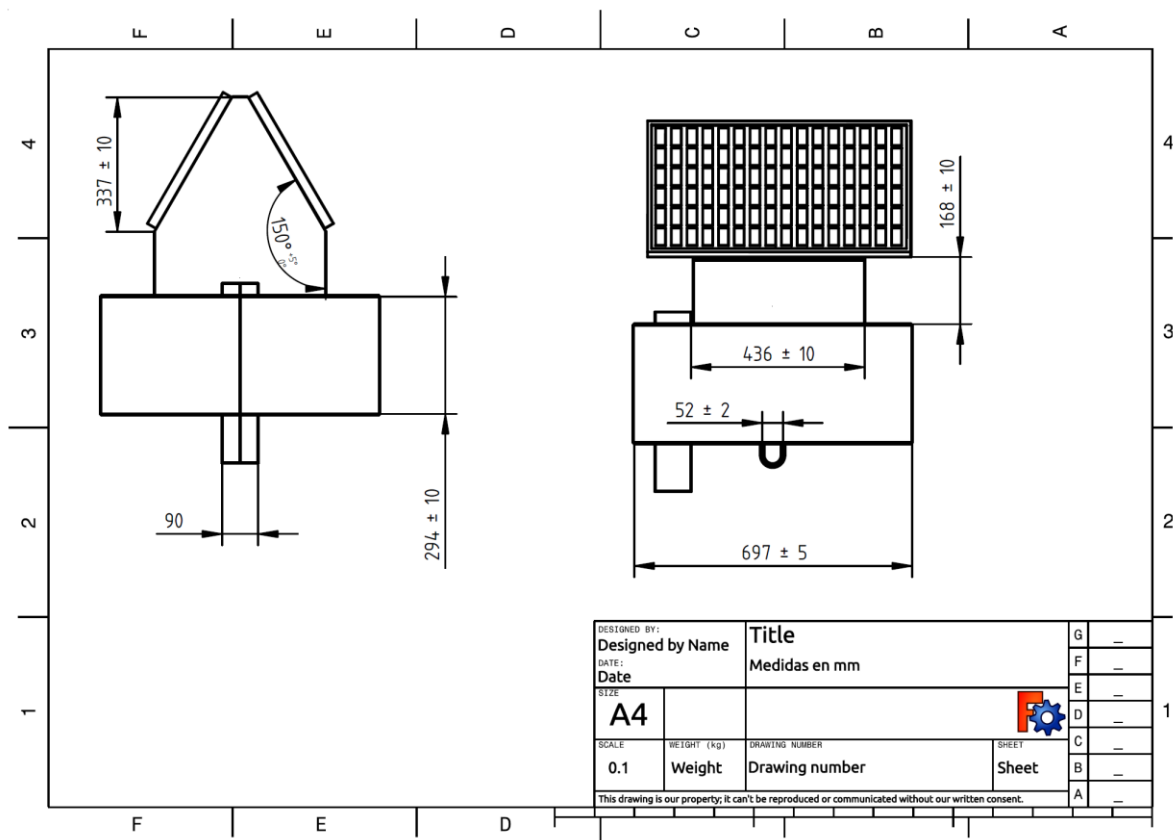


Figura 15. Dimensiones de la boya y el panel solar.

2.3. Fase 3. Instalación

Luego de diversas pruebas tanto de las boyas como del canal de entrada de datos, realizadas en las instalaciones de la Fundación IMDEA-Agua, se procedió a instalar las boyas en los puntos de muestreo (tabla 3), cuya ubicación en las masas de agua se puede verse en la figura 3. Para la localización de las boyas con los sensores de calidad de agua se tuvo en cuenta las características geométricas de ambas masas de agua de manera que pudiera obtenerse una distribución representativa de los distintos sectores en los que pudieran dividirse. En la medida de lo posible, se evitaron enclaves en los que la afluencia de embarcaciones fuera asidua de manera que pudieran evitarse accidentes de cualquier tipo que pudieran dañar el buen funcionamiento de los instrumentos alojados en ellas.

La instalación de las estaciones meteorológicas obedeció a criterios prácticos en los que se priorizó la accesibilidad, por un lado, y la seguridad por otro.

Tabla 3. Puntos de toma de muestras

Embalse de As Conchas			Albufera de Valencia		
Nombre	Marca - Tipo	Ubicación	Nombre	Marca - Tipo	Ubicación
Y1	YSI - Boya	Presa	Y3	YSI - Boya	A1
Y2	YSI - Boya	Playa	Y4	YSI - Boya	B2
L1	Libelium - Boya	Cados	L4	Libelium - Boya	B1
L2	Libelium - Boya	Termas	L5	Libelium - Boya	C2
L3	Libelium - Estación Meteorológica	Presa	L6	Libelium - Estación Meteorológica	GVA Oficina de Gestión Técnica

2.3.1. Albufera de Valencia

En la Albufera de Valencia se instalaron (febrero de 2020) cinco nodos, cuatro para monitorizar parámetros de la calidad del agua (Figura 16) y uno para parámetros climáticos (Figura 17).



(a) Traslado en barca del Ayuntamiento de las 4 boyas a instalar en la Albufera de Valencia



(b) Boya con un nodo de Libelium



(c) Boya con un nodo de Ysi

Figura 16. Instalación inicial de las boyas en la Albufera de Valencia.

Para fijar las boyas en los puntos de toma de muestras, se empleó un bloque de hormigón de dimensiones 30 × 20 × 15 cm, con una masa aproximada de 18 kg por unidad. Para cada punto, se unieron dos bloques mediante una cadena inoxidable de 5 mm dejando una separación de 1,5 m entre ambos bloques. Luego, uno de ellos es unido a la parte inferior de la boya mediante un perno giratorio para evitar que el giro de la boya afectara a la cadena. La ubicación seleccionada para la estación meteorológica WS-3000 (Figure 17) con su correspondiente nodo fue la oficina de gestión técnica del parque de la Albufera de Valencia.



Figura 17. Instalación inicial de la estación meteorológica WS-3000 con su correspondiente nodo en la oficina de gestión técnica del parque de la Albufera de Valencia.

2.3.2. Embalse de as Conchas (Galicia)

Durante el proyecto CianMOD se instalaron un total de tres nodos Libelium en la zona del embalse de As Conchas. Dos de ellos insertados en boyas para monitorizar parámetros del agua (figura 18) y una estación meteorológica (figura 19). La instalación fue realizada en noviembre de 2019. Estos nodos se añadieron a los dos de tecnología YSI ya existentes en el embalse

El material y método empleado para fijar las boyas en los puntos de toma de muestras es igual al empleado en la Albufera de Valencia, con la salvedad de los trabajos específicos realizados en la

Albufera al tener en cuenta que se trata de una masa de aguas someras, con poca profundidad cuyas oscilaciones podrían afectar a la flotabilidad de las boyas y al buen funcionamiento de los sensores y nodos instalados en ellas. La estación meteorológica se instaló sobre-elevada en una caseta protegida de la presa de acceso restringido y sólo posible con autorización.



Figura 18. Instalación inicial de las boyas con nodos Libelium en el embalse de As Concha.



Figura 19. Instalación inicial de la estación meteorológica WS-3000 en la zona de la presa.

2.4. Fase 4. Datos registrados

Luego de instaladas las boyas en las zonas de estudio, los nodos han medido y envían datos hacia el servidor central ubicado en la Fundación IMDEA-Agua de manera continua cada 15 minutos. A modo de ejemplo se muestra, en las figuras 20 y 21, los datos recopilados durante el año 2020 de algunos de los parámetros en las masas de agua bajo estudio, tanto de calidad del agua (figura 20) como climáticos (figura 21).

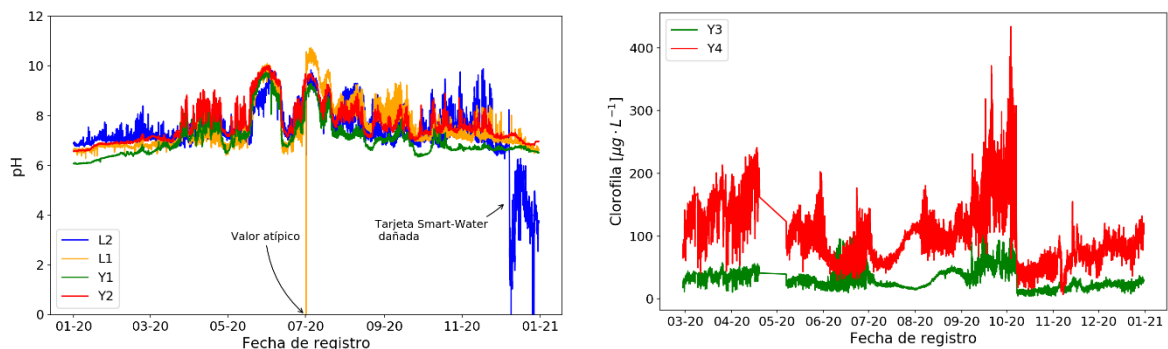


Figura 20. Algunos parámetros de calidad del agua recogidos en las zonas estudiadas. Izquierda: pH en el embalse de As Conchas. Derecha: clorofila en la Albufera de Valencia.

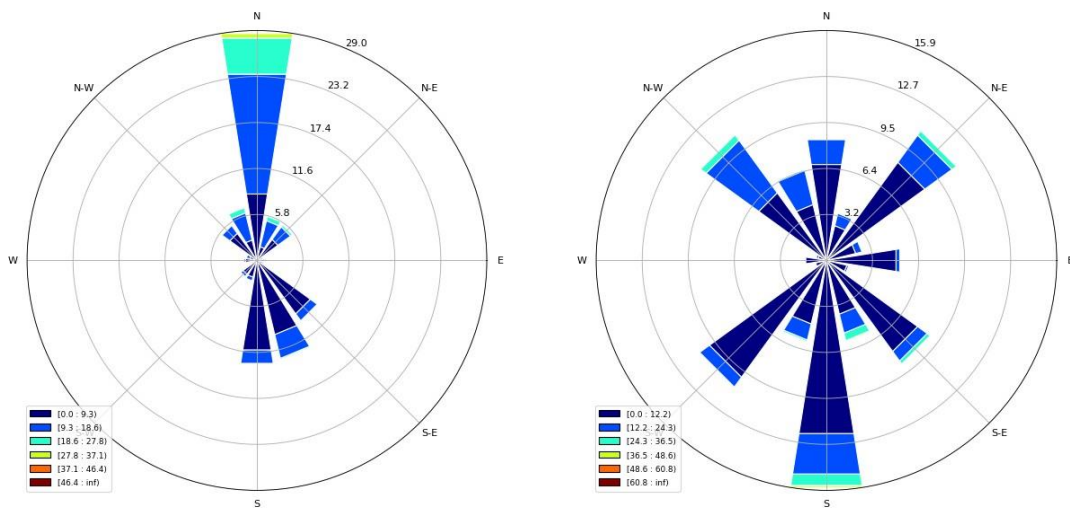


Figura 21. Gráfica de dirección y velocidad del viento medidos en las estaciones meteorológicas de As Conchas (izquierda y de la Albufera de Valencia (derecha).

B.2. Sistemas abiertos para la consulta de datos en tiempo real en Internet

1. Justificación

El proyecto CIANOMOD permite a los organismos públicos y privados abordar la problemática de los cada vez más habituales afloramientos de algas y cianobacterias nocivas en las masas de agua continentales. Para la elaboración de esta metodología se combina el uso de la teledetección y sensores a remoto teniendo como base las tecnologías de IoT (Internet of Things) y BigData.

Esta plataforma permite la visualización de los datos subidos por los sensores que se encuentran en las diferentes masas de agua del territorio. Permite la visualización de series temporales de las diferentes variables guardadas.

2. Procedimiento

El proyecto CianoMOD contempla la creación de una página WEB como parte instrumental del enfoque dado al seguimiento continuado de los parámetros relacionados con la calidad del agua que pueden tener una mayor relación con la presencia de cianobacterias en masas de agua dulce. La página WEB debe incluir necesariamente la localización de las masas de agua a las que se les hace seguimiento, la localización de las mismas en un mapa (WEB mapping) y el acceso a la información recogida por los sensores en cada uno de los puntos de muestreo de manera continuada, en tiempo real.

Necesariamente, su diseño debe contemplar una serie de características técnicas ineludibles, pero también debe permitir la consulta de los datos y el acceso con distintos niveles de intervención y responsabilidad de los usuarios. Para acometer todos los aspectos previstos en su diseño, su construcción se ha realizado en cinco fases (figura 1) de manera que se incluyan en ella aspectos tanto conceptuales (fases 1 a 3) como instrumentales (fases 4 y 5).

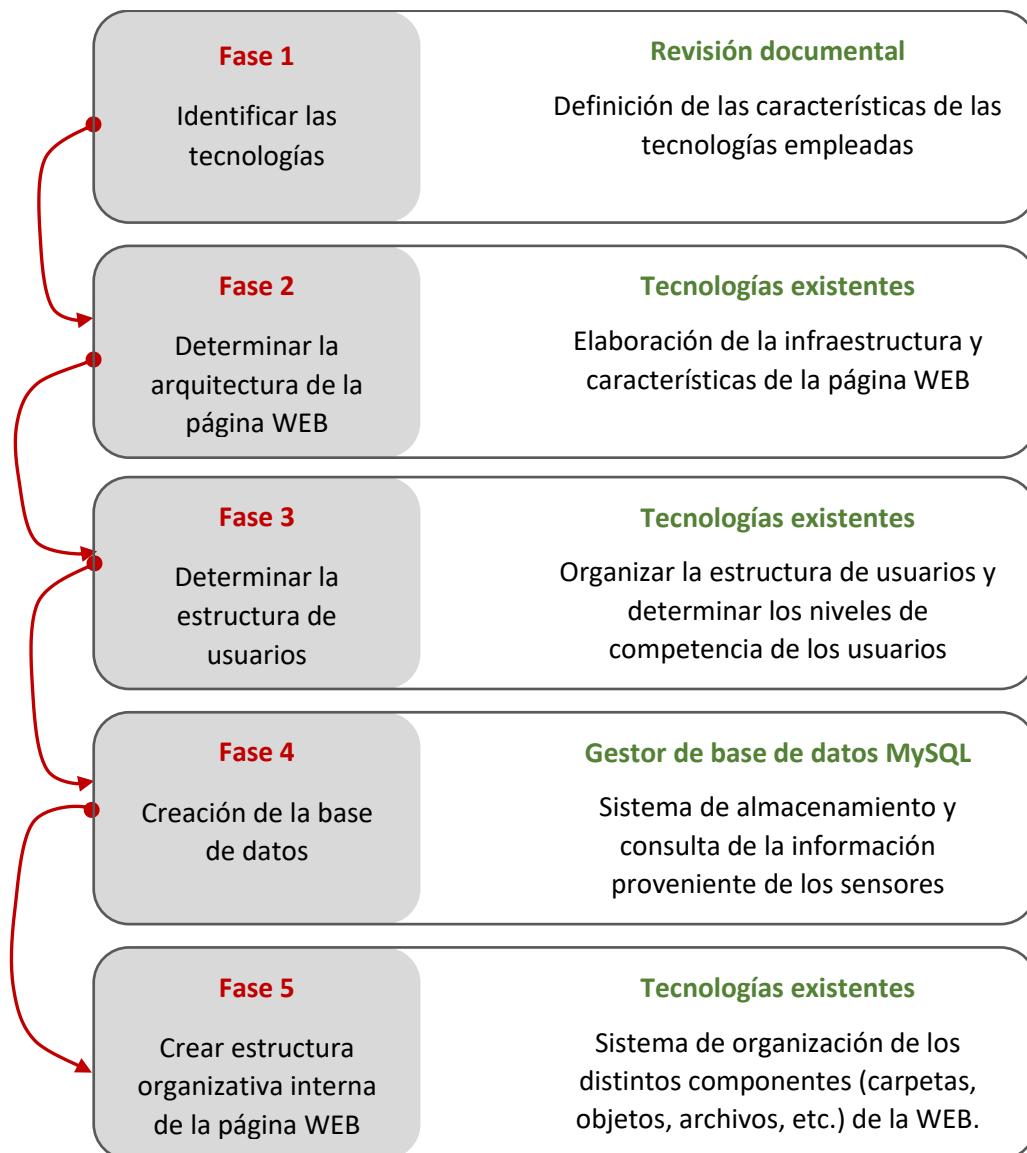


Figura 1. Fases del procedimiento seguido en la construcción de la página WEB del proyecto CianoMOD. Izquierda: objetivo de la fase, derecha: resumen del procedimiento seguido.

2.1. Fase 1. Definición y características de las tecnologías utilizadas

Se ha seguido el paradigma de orientación a objetos. El lenguaje de programación presente en todo el proyecto es Java. Se ha seleccionado este lenguaje dado el conocimiento previo de este lenguaje, además de la facilidad y fluidez que ofrece para desplegar en cualquier sistema operativo, el software desarrollado gracias a su máquina virtual (JVM). La JVM dota de una capa intermedia con el sistema operativo en el que se despliegue, por lo que se puede asegurar un funcionamiento similar en todos los sistemas operativos. A continuación, se desglosará las herramientas utilizadas y en qué parte se han utilizado.

2.1.1. Servidor

Para el servidor, las tecnologías usadas han sido Apache Tomcat y GlassFish como contenedor web, donde se aloja el portal, ejecutado desde un archivo de Spring Boot con el uso de Spring Tool Suit 4 y un .war alojado en GlassFish. Por último, es necesario tener instalada la aplicación MySQL Server, un gestor de base de datos que nos permite persistir todos los datos. El motivo de utilizar esta base de datos relacional es la atomicidad de las operaciones en la base de datos, es decir, un cambio debe completarse en su totalidad o no modificar nada en absoluto garantizando que las transacciones de la base de datos se procesan de manera fiable.

2.1.2. Portal web

El portal web CianoMOD utiliza el patrón de arquitectura MVC (*Modelo Vista Controlador*) que consiste en tres componentes: el modelo que nos aporta una capa para poder trabajar con los datos y realiza las acciones de crear, consultar, borrar o actualizar; la vista, que se encarga de cómo mostrar los datos solicitados por el usuario y el controlador, que es la parte que recibe las órdenes del usuario y se encarga de solicitar los datos al modelo y comunicárselo a la vista. Las tecnologías que se han usado para el desarrollo Web han sido las siguientes:

- Java (Benites, ¿Que és Java y por qué aprenderlo?, s.f.)
 - Spring Security (Comunidad Spring, s.f.)
 - Spring Data (Spring, s.f.)
 - Spring Boot (ÁLVAREZ, ¿Qué es Spring Framework?, 2014)
 - Thymeleaf (BORILLO, 2012)
- HTML5 (Hipertextual, s.f.)
- jQuery (Chuburu, s.f.)
- MVC (Alvarez, 2014)
- Maven (Oterino, 2014)
- Json (Json, s.f.)
- JPA — Hibernate (ÁLVAREZ, ¿Qué es Spring Framework?, 2014)
- JSP (JavaServer Pages)

El motivo para utilizar Spring ha sido por la cantidad de módulos que se pueden utilizar, en concreto en este proyecto se han utilizado los siguientes módulos:

- Spring Security: Este módulo nos permite dotar de seguridad a nuestro servidor. De esta forma delegamos las funciones de quién puede acceder a determinadas recursos aportando protección contra las vulnerabilidades más comunes.
- Spring Data: Acceso a datos simplificado. Ya trabajes con una base de datos relacional o no relacional, con Spring Data podrás abstraer y simplificar el acceso a la misma reduciendo errores y tiempo de desarrollo.

- Spring Boot: Módulo que permite abstraernos de la configuración del proyecto. Este módulo junto a Maven generar un proyecto con todas las tecnologías necesarias para el proyecto. Maven hace que podamos descargar las dependencias que nuestro proyecto necesita en cada momento buscándolas en un repositorio.
- Thymeleaf: Este módulo permite mediante el motor de plantillas Thymeleaf tener un mismo lenguaje en los ficheros HTML. Por lo que resulta más fácil su comprensión a la hora de su mantener estos ficheros y los formularios que contienen. El resultado final que aporta esta herramienta es un fichero HTML5.

La parte dinámica de la web está desarrollada en jQuery, que es una biblioteca de JavaScript y nos permite simplificar la manera de interactuar con los ficheros HTML.

Otra parte del portal web corresponde a un API REST, en el que mediante llamadas a servicios a través de controladores se recibe la información solicitada mediante una respuesta *http* en formato JSON. Este formato de texto ligero nos permite que dos entornos puedan intercambiarse datos. La estructura de este formato sería de esta forma:

```
{
  "Nombre": "Juan",
  "Edad": 28,
  "Aficiones": ["Música", "Cine", "Tenis"],
  "Residencia": "Madrid"
}
```

Como se puede observar esta estructura se corresponde con:

- Un conjunto de pares (clave, valor) encerrado entre los caracteres “{” y “}”, separando la clave del valor por el símbolo “:”, y separando cada par del siguiente con el carácter “,”
- Un conjunto ordenado de valores encerrado entre los caracteres “[” y “]”, y separando cada valor del siguiente con el carácter “,”.

Este formato que aporta JSON permite que se pueda “*parsear*” la información en el cliente REST que reciba esta información. En el caso de este TFG será la aplicación móvil.

Para persistir los datos añadimos una capa más con JPA e Hibernate que nos permite interactuar con la base de datos abstrayéndonos de como insertar, actualizar o borrar en la base de datos. Esta forma de trabajar nos permite que si en un momento dado se decide cambiar el gestor de base de datos se produzca de forma transparente para toda la lógica del negocio.

2.1.3. Otras herramientas

Para programar todo este software necesitamos tener una herramienta para su desarrollo. Se ha utilizado para desarrollar el portal web el IDE *Spring Tool Suite*. El motivo de utilizar esta plataforma de desarrollo reside en no tener que preocupar por instalar todos los *plugins* necesarios para poder desarrollar con el *Framework Spring*.

Para desarrollar el software de la aplicación móvil se ha utilizado la plataforma *Android Studio* dado que, esta plataforma es la herramienta oficial para desarrollar aplicaciones en Android. Por último, se ha usado *MySQL Workbench* para facilitar la interacción esta herramienta nos facilita de una forma visual interactuar con la base de datos de una forma visual.

2.2. Fase 2. Diseño de la arquitectura e infraestructura de la página WEB CianoMOD

Para el diseño de la infraestructura de esta plataforma se ejecuta sobre un único servidor, en el que se encuentran tanto el contenedor web como la base de datos. Esta arquitectura se desplegará en un servidor proporcionado por la universidad que se está utilizando para el entorno de Preproducción hasta su posterior implementación en una máquina virtual en el IMDEA Agua (Figura 2).

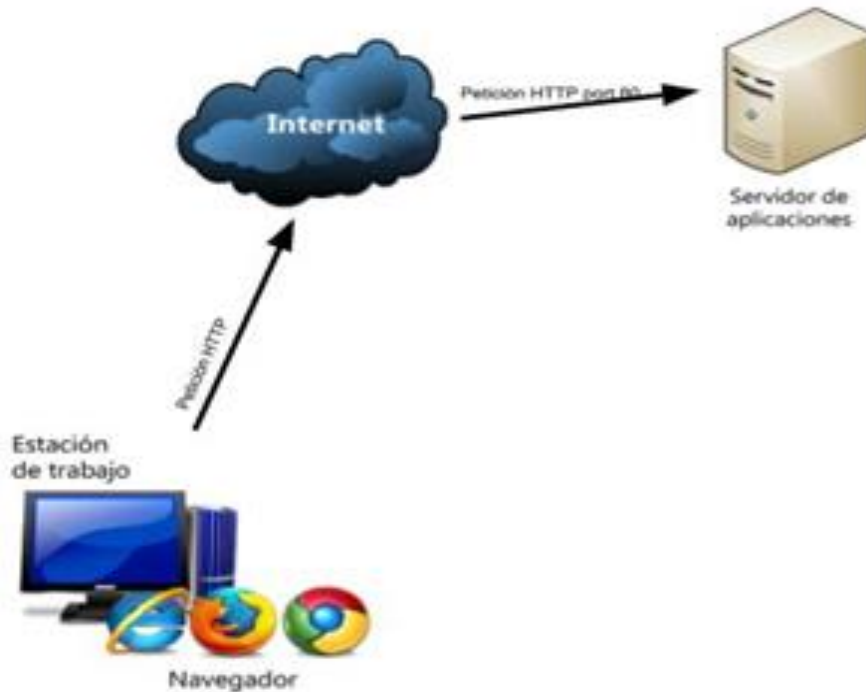


Figura 2. Infraestructura del portal web.

2.3. Fase 3. Definición de usuarios

La plataforma web es de acceso público. Está organizada en tres niveles de usuario con competencias distintas. El tipo de usuario Administrador es al que se les otorga funcionalidades avanzadas y acceso a más opciones. Este usuario accede en la plataforma web mediante un formulario en el que se introduce la dirección de correo del usuario y la contraseña. En el siguiente diagrama de casos de uso representado en la figura 3, se muestran las diferentes acciones que el usuario puede realizar.

Público	<ul style="list-style-type: none">• Información general• Visualizar mapas
Cliente	<ul style="list-style-type: none">• Visualizar datos• Descarga de datos
Administrador	<ul style="list-style-type: none">• Visualización de series temporales• Descargar datos• Gestión de clientes

Figura 3. Niveles de usuario y competencias en el portal web

2.4. Fase 4. Creación de la Base de datos

El portal web CIANOMOD utiliza MySQL como sistema gestor base de datos que utilizamos para dotar de persistencia al sistema. Este SGBD contiene una base de datos llamada cianomodBBDD que contiene cada una de las tablas necesarias para almacenar esta información. Que se ilustran de forma gráfica mediante un diagrama de Entidad-Relación aportado en el ANEXO I.

A continuación, se va a mostrar y explicar las tablas más representativas de la base de datos, con el fin de comprender un poco más el funcionamiento de la plataforma. Cada tabla que se representa da una explicación de los valores que guarda y el motivo por el cual se ha decidido guardar.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se representa la tabla datos de la base de datos en la que se guardan todos los datos de los sensores de un. Los campos que contiene son los que se muestran a continuación.

Tabla 1. Tabla Place de la base de datos

CAMPO	DESCRIPCIÓN	TIPO	VALOR
<i>id_datos</i>	Identificador	INT(11)	PK, NN, AI
<i>rtc_unix_timestap</i>	Fecha de recogida del dato	BIGINT(20)	NN
<i>anemometer</i>	Valor de la medición del anemómetro	FLOAT	NN
<i>bateria</i>	Valor de la batería	FLOAT	NN
<i>bgapc_rfu</i>	Valor de la medición del bgapc_rfu	FLOAT	NN
<i>bgapc_ug_l</i>	Valor de la medición del bgapc_ug_l	FLOAT	NN
<i>clorofila</i>	Valor de la medición de la clorofila	FLOAT	NN
<i>conductividad</i>	Valor de la medición de la conductividad	FLOAT	NN
<i>coordinada_sensor</i>	Coordinada del sensor	VARCHAR(20)	NN
<i>fecha_registro</i>	Fecha del registro	TIMESTAMP	NN
<i>fluorescence_pct_fs</i>	Valor de la medición de fluorescencia	FLOAT	NN
<i>frame</i>	Frame de datos enviados por el sensor	VARCHAR(500)	NN
<i>nitrate</i>	Valor de la medición del nitrato	FLOAT	NN
<i>orp</i>	Valor del orp	FLOAT	NN
<i>ph</i>	Valor de la medición del ph	FLOAT	NN
<i>pigmentos</i>	Valor de la medición de los pigmentos	FLOAT	NN
<i>pluviometer_current_hour</i>	Valor de la medición del pluviómetro actual	FLOAT	NN
<i>pluviometer_last24hour</i>	Valor de la medición del pluviómetro de las últimas 24 horas	FLOAT	NN
<i>pluviometer_previous_hour</i>	Valor de la medición del pluviómetro de la última hora	FLOAT	NN
<i>radiation</i>	Valor de la medición de la radiación	FLOAT	NN
<i>temperatura</i>	Valor de la medición de la temperatura	FLOAT	NN
<i>windvane</i>	Valor de la medición del viento	FLOAT	NN
<i>id_ubicacion</i>	Identificador la la ubicación	INT(11)	NN

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra la tabla de “ubicaciones” de la base de datos en la que se guarda toda la información relevante a una ubicación. Los campos que contiene son los que se muestran a continuación.

Tabla 2. Tabla de ubicaciones

CAMPO	DESCRIPCIÓN	TIPO	VALOR
<i>id_ubicacion</i>	Identificador	INT(11)	PK
<i>Coordenada_nodo</i>	Coordenada del nodo	VARCHAR(255)	NN
<i>Fecha_ubicacion</i>	Fecha de alta del nodo	TIMESTAMP	NN
<i>ubicacion</i>	Nombre de la ubicación	VARCHAR(255)	NN
<i>Id_lugar</i>	Identificador del lugar	INT(11)	NN
<i>Id_nodo</i>	Identificador del nodo	INT(11)	NN

En la Tabla 1, se muestra la tabla de “lugares” de la base de datos en la que se guarda toda la información relevante a un lugar. Los campos que contiene son los que se muestran a continuación.

Tabla 1. Tabla de lugares

CAMPO	DESCRIPCIÓN	TIPO	VALOR
<i>id_lugar</i>	Identificador	INT(11)	PK
<i>coordenada_lugar</i>	Coordenada del lugar	VARCHAR(255)	
<i>lugar</i>	Nombre del lugar	VARCHAR(255)	NN, UQ

En la Tabla 2, se muestra la tabla de “clients” de la base de datos en la que se guarda toda la información relevante a un cliente. Los campos que contiene son los que se muestran a continuación.

Tabla 2. Tabla de clientes

CAMPO	DESCRIPCIÓN	TIPO	VALOR
<i>id_client</i>	Identificador	INT(11)	PK
<i>id_lugar</i>	Identificador del lugar	INT(11)	NN
<i>id_user</i>	Identificador del usuario	BIGINT(20)	NN, UQ

En la Tabla 3, se muestra la tabla de “users” de la base de datos en la que se guarda toda la información relevante a un usuario. Los campos que contiene son los que se muestran a continuación.

Tabla 3. Tabla de usuarios

CAMPO	DESCRIPCIÓN	TIPO	VALOR
<i>id_user</i>	Identificador	BIGINT(11)	PK
<i>active</i>	Situación del usuario	INT(11)	
<i>email</i>	Email del usuario	VARCHAR(255)	NN, UQ
<i>last_name</i>	Apellido del usuario	VARCHAR(255)	
<i>name</i>	Nombre del usuario	VARCHAR(255)	
<i>password</i>	Contraseña del usuario	VARCHAR(255)	NN, UQ
<i>role_id</i>	Identificador del rol	BIGINT(20)	

En la Tabla 4, se muestra la tabla de “role” de la base de datos en la que se guardan los distintos tipos de roles de la plataforma. Los campos que contiene son los que se muestran a continuación.

Tabla 4. Tabla de rol

CAMPO	DESCRIPCIÓN	TIPO	VALOR
<i>id</i>	Identificador	INT(11)	PK
<i>role</i>	Rol	INT(11)	NN

En la Tabla 5, se muestra la tabla de “valores_control” de la base de datos donde se guardan los valores de control de los posibles escenarios, cuyos campos se muestran a continuación.

Tabla 5. Tabla valores de control

CAMPO	DESCRIPCIÓN	TIPO	VALOR
<i>id_control</i>	Identificador	INT(11)	PK, NN, AI
<i>clorof_max</i>	Valor máximo de la clorofila	FLOAT	
<i>clorof_min</i>	Valor mínimo de la clorofila	FLOAT	
<i>cond_max</i>	Valor máximo de la conductividad	FLOAT	
<i>cond_min</i>	Valor mínimo de la conductividad	FLOAT	
<i>escenario</i>	Escenario de los valores	INT(11)	NN
<i>nitrato_max</i>	Valor máximo del nitrato	FLOAT	
<i>nitrato_min</i>	Valor mínimo del nitrato	FLOAT	
<i>ph_max</i>	Valor máximo del ph	FLOAT	
<i>ph_min</i>	Valor mínimo del ph	FLOAT	
<i>pigm_max</i>	Valor máximo de la pigmentación	FLOAT	
<i>pigm_min</i>	Valor mínimo de la pigmentación	FLOAT	
<i>temp_max</i>	Valor máximo de la temperatura	FLOAT	
<i>temp_min</i>	Valor mínimo de la temperatura	FLOAT	
<i>id_client</i>	Identificador la ubicación	INT(11)	NN

En la Tabla 6, se muestra la tabla de “incidencias” de la base de datos en la que se guardan las incidencias. Los campos que contiene son los que se muestran a continuación.

Tabla 6. Tabla de incidencias

CAMPO	DESCRIPCIÓN	TIPO	VALOR
<i>id_incidencia</i>	Identificador	INT(11)	PK
<i>fecha_incidencia</i>	Fecha de la incidencia	TIMESTAMP	NN
<i>codigo_incidencia</i>	Código de la incidencia	INT(11)	NN
<i>id_control</i>	Identificador del valor de control	INT(11)	NN
<i>id_datos</i>	Identificador del dato	INT(11)	NN

En la Tabla 7, se muestra la tabla de “codigo_incidencia” de la base de datos en la que se guardan los tipos de incidencias. Los campos que contiene son los que se muestran a continuación.

Tabla 7. Tabla de código de incidencias

CAMPO	DESCRIPCIÓN	TIPO	VALOR
<i>codigo_incidencia</i>	Código de la incidencia	INT(11)	PK
<i>incidencia</i>	Tipo de incidencia	VARCHAR(255)	NN

En la Tabla 8, se muestra la tabla de “error” de la base de datos en la que se guardan los errores. Los campos que contiene son los que se muestran a continuación.

Tabla 8. Tabla de error

CAMPO	DESCRIPCIÓN	TIPO	VALOR
<i>id_error</i>	Identificador	INT(11)	PK
<i>fecha_error</i>	Fecha del error	TIMESTAMP	NN
<i>codigo_error</i>	Código del error	INT(11)	NN
<i>id_datos</i>	Identificador del dato	INT(11)	NN

En la Tabla 9, se muestra la tabla de “codigo_error” de la base de datos en la que se guardan los códigos de los errores. Los campos que contiene son los que se muestran a continuación.

Tabla 9. Tabla de codigo de error

CAMPO	DESCRIPCIÓN	TIPO	VALOR
<i>codigo_error</i> <i>error</i>	Código del error	INT(11)	PK
	Tipo de error	VARCHAR(255)	NN

En la Tabla 10, se muestra la tabla de “alarmas” de la base de datos en la que se guardan las alarmas. Los campos que contiene son los que se muestran a continuación.

Tabla 10. Tabla de alarmas

CAMPO	DESCRIPCIÓN	TIPO	VALOR
<i>id_alarma</i>	Identificador	INT(11)	PK
<i>fecha_alarma</i>	Fecha de la alarma	TIMESTAMP	NN
<i>codigo_alarma</i>	Código de la alarma	INT(11)	NN
<i>id_datos</i>	Identificador del dato	INT(11)	NN

En la tabla 13, se muestra la tabla de “codigo_alarma” de la base de datos en la que se guarda la codificación de las alarmas. Los campos que contiene son los que se muestran a continuación.

Tabla 11. Tabla de codigo de alarmas

CAMPO	DESCRIPCIÓN	TIPO	VALOR
<i>codigo_alarma</i> <i>alarma</i>	Código de la alarma	INT(11)	PK
	Tipo de alarma	VARCHAR(255)	NN

En la Tabla 12, se muestra la tabla de “frame_discarted” de la base de datos en la que se guardan las tramas descartadas. Los campos que contiene son los que se muestran a continuación.

Tabla 12. Tabla de frames descartados

CAMPO	DESCRIPCIÓN	TIPO	VALOR
<i>id_fnp</i>	Identificador	INT(11)	PK
<i>fecha_registro_discarted</i> <i>frame</i>	Fecha del frame	TIMESTAMP	NN
	Frame descartado	VARCHAR(255)	NN

En la Tabla 13, se muestra la tabla de “umbrales” de la base de datos en la que se guardan los umbrales de las variables. Los campos que contiene son los que se muestran a continuación.

Tabla 13. Tabla umbrales

CAMPO	DESCRIPCIÓN	TIPO	VALOR
<i>id_umbrales</i>	Identificador	INT(11)	PK, NN, AI
<i>u_clorof_max</i>	Valor máximo de la clorofila	FLOAT	NN
<i>u_clorof_min</i>	Valor mínimo de la clorofila	FLOAT	NN
<i>u_cond_max</i>	Valor máximo de la conductividad	FLOAT	NN
<i>u_cond_min</i>	Valor mínimo de la conductividad	FLOAT	NN
<i>u_nitrato_max</i>	Valor máximo del nitrato	FLOAT	NN
<i>u_nitrato_min</i>	Valor mínimo del nitrato	FLOAT	NN
<i>u_ph_max</i>	Valor máximo del ph	FLOAT	NN
<i>u_ph_min</i>	Valor mínimo del ph	FLOAT	NN
<i>u_pigm_max</i>	Valor máximo de la pigmentación	FLOAT	NN
<i>u_pigm_min</i>	Valor mínimo de la pigmentación	FLOAT	NN
<i>u_temp_max</i>	Valor máximo de la temperatura	FLOAT	NN
<i>u_temp_min</i>	Valor mínimo de la temperatura	FLOAT	NN

2.5. Fase 5: Organización de las carpetas

En el siguiente apartado, se explicará cómo está organizado el portal web (tabla 16), en la parte izquierda de esta tabla se indica el paquete (carpeta donde se encuentra la información) y en la derecha la descripción de cada uno de los paquetes.

Tabla 14. organización proyecto portal web

<i>Carpeta/Paquete</i>	Descripción
<i>src\main\java\com\cianomod\configuration</i>	Contiene todos los archivos necesarios para configurar la aplicación
<i>src\main\java\com\cianomod\controller</i>	Contiene todos los archivos referentes a las URL públicas para acceder a los datos mediante web o API REST
<i>src\main\java\com\cianomod\model</i>	Contiene todos los objetos de la aplicación
<i>src\main\java\com\cianomod\repository</i>	Contiene las interfaces para que un objeto del modelo pueda operar con la base de datos
<i>src\main\java\com\cianomod\service</i>	Contiene la lógica de negocio que es posible realizar
<i>src\main\resources\static</i>	Recursos estáticos que complementan a las páginas de HTML
<i>src\main\resources\templates</i>	Archivos HTML con formularios para operar de forma gráfica sobre el modelo

3. Implementación y guía de uso

A continuación, se hará una descripción de como se ha implementado todo el sistema.

3.1. Requisitos de hardware

Para desplegar este sistema en cada uno de los escenarios mostrados en el apartado 2.2. Diseño de la Fase 2. Diseño **de la arquitectura e infraestructura**, es necesario que cada nodo tenga un sistema operativo basado en Linux, en nuestro caso hemos utilizado Ubuntu 18.04 LTS el cual necesita los siguientes requisitos mínimos:

- Procesador de 1 GHz (por ejemplo, Intel Celeron) o mejor.
- 1.5 GB RAM (Memoria del sistema).
- 7 GB de espacio libre en la unidad interna para la instalación.
- Una unidad de DVD o un conector USB para el medio de instalación.
- Acceso a internet (para instalar actualizaciones durante el proceso de instalación)

Si el nodo es el destinado a ser el contenedor web es necesario instalar la librería JDK de Java, sin embargo, si el nodo es el destinado a la base de datos es necesario instalar MySQL.

Esta configuración sería para el escenario distribuido en la nube. Sin embargo, para el despliegue en la universidad es suficiente con un nodo el cual se puede instalar estos softwares en el mismo nodo. La guía de instalación se mostrará de forma más detallada en el Anexo I de este documento, donde se explican los detalles paso a paso de cómo preparar toda la plataforma para los entornos de producción y desarrollo.

3.2. Guía de uso

En este apartado vamos a explicar el manejo de la plataforma web desde un usuario público y desde el usuario administrador. Al acceder al portal web lo que nos vamos a encontrar es con una pantalla (Figura 4) en la que nos muestra la información general del proyecto.



Figura 4. Pantalla nueva Guía. Portal web

Esta pantalla tiene un menú en la parte superior común a todas las pantallas. Contiene las siguientes opciones de "Información", "Mapa", "Series Temporales" y "Fotos", en la barra de navegación, e "Inicio", "Acerca de", "Contacto" y "Login" en la barra superior.

- Al hacer “click” en Información, nos mostrará la siguiente pantalla (

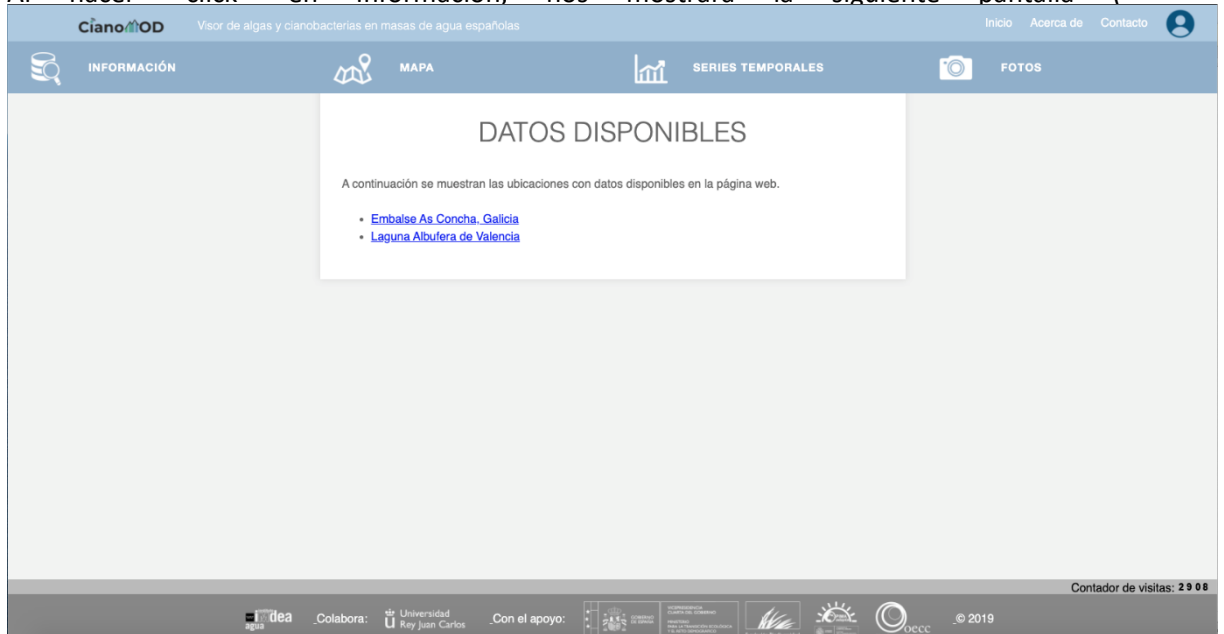


Figura 5), donde deberemos de escoger de qué ubicación queremos obtener más información.

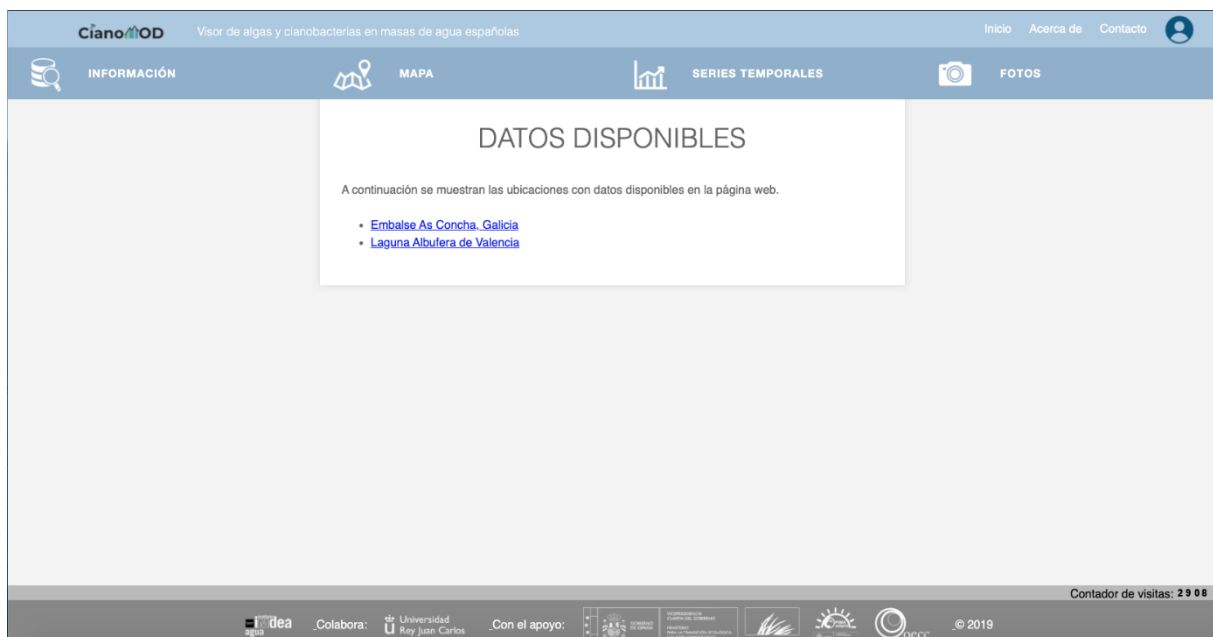


Figura 5. Página de Información de las localizaciones

Una vez escogida una ubicación, se mostrará una página con los datos relativos a esa ubicación (Figura 6).



Figura 6. Página de información del Embalse As Conchas (Galicia)

- Si hacemos click en Mapa en la barra de navegación, se nos mostrará un mapa en el que aparecerán representados un punto con las cada una de las localizaciones de las masas de aguas que se monitorizan en este proyecto (Figura 7).

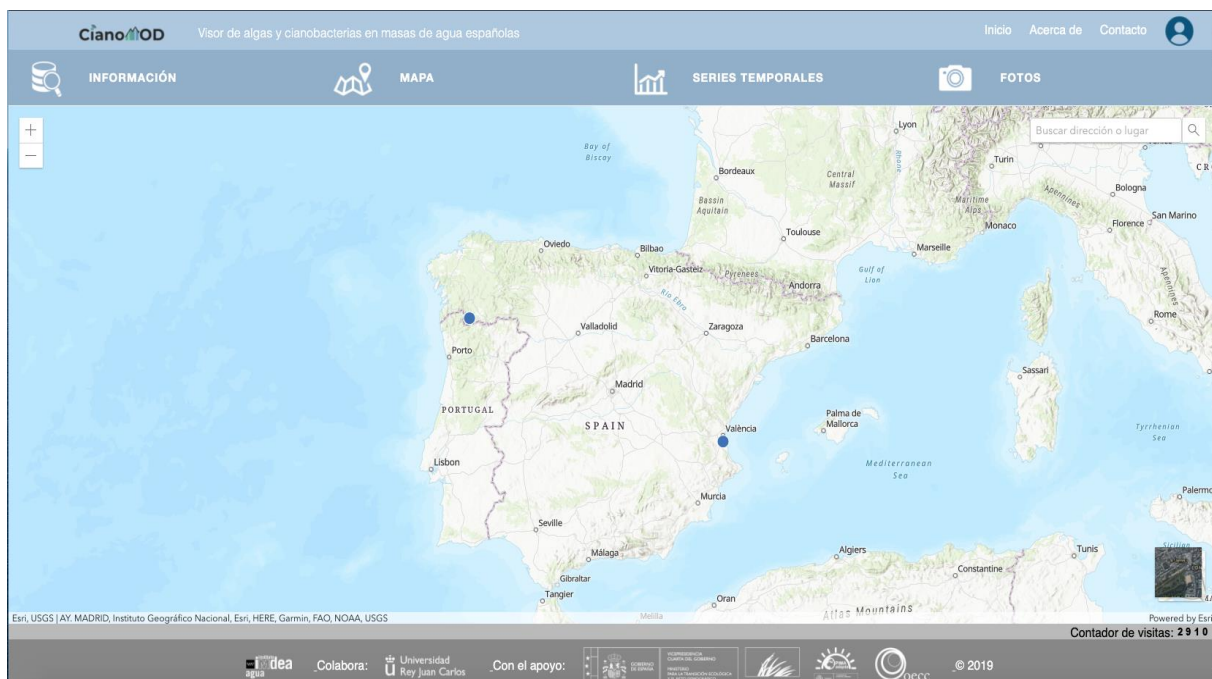


Figura 7. Página de mapa con las ubicaciones del proyecto.

Si clicamos sobre uno de los puntos, se nos desplegará un cuadro con la información de la variable en los diferentes nodos que hay en dicha ubicación (Figura 8).

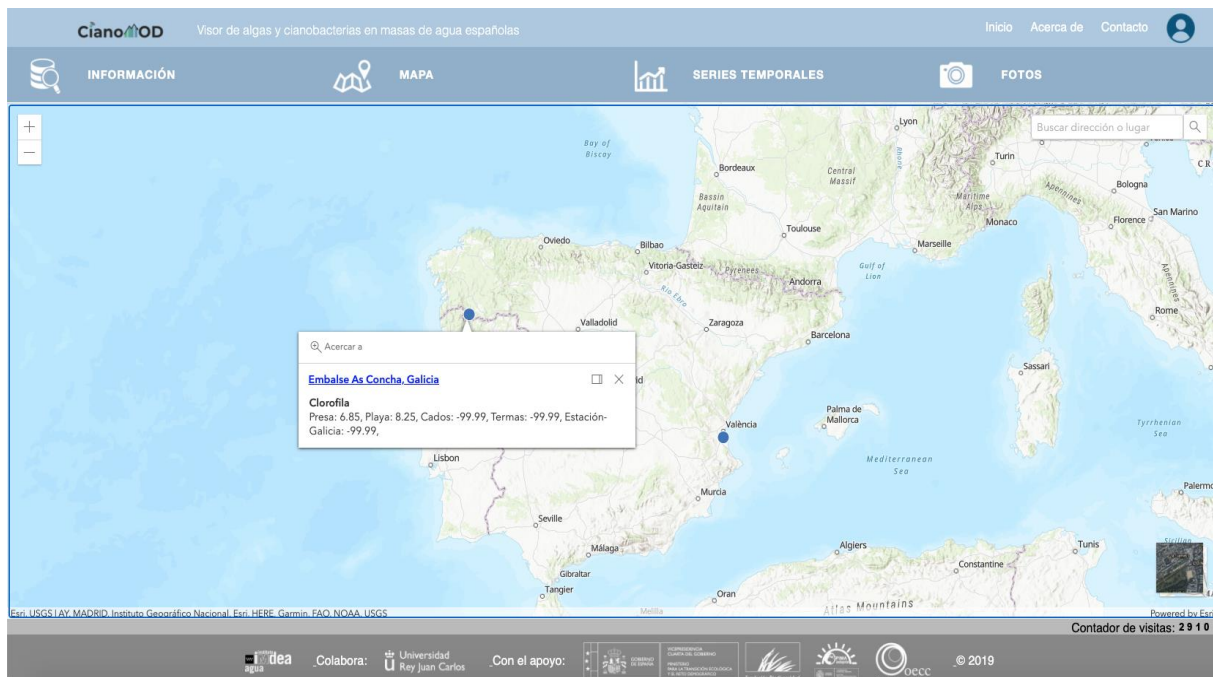


Figura 8. Mapa con cuadro de ubicación desplegado.

Pasando el ratón por encima de la opción de Mapa de la barra de navegación, se desplegará una tabla con las diferentes opciones de las posibles variables de calidad de agua y valores climáticos que se pueden mostrar en el mapa (Figura 9). Esa información está vinculada a una base de datos que se actualiza cada quince minutos.

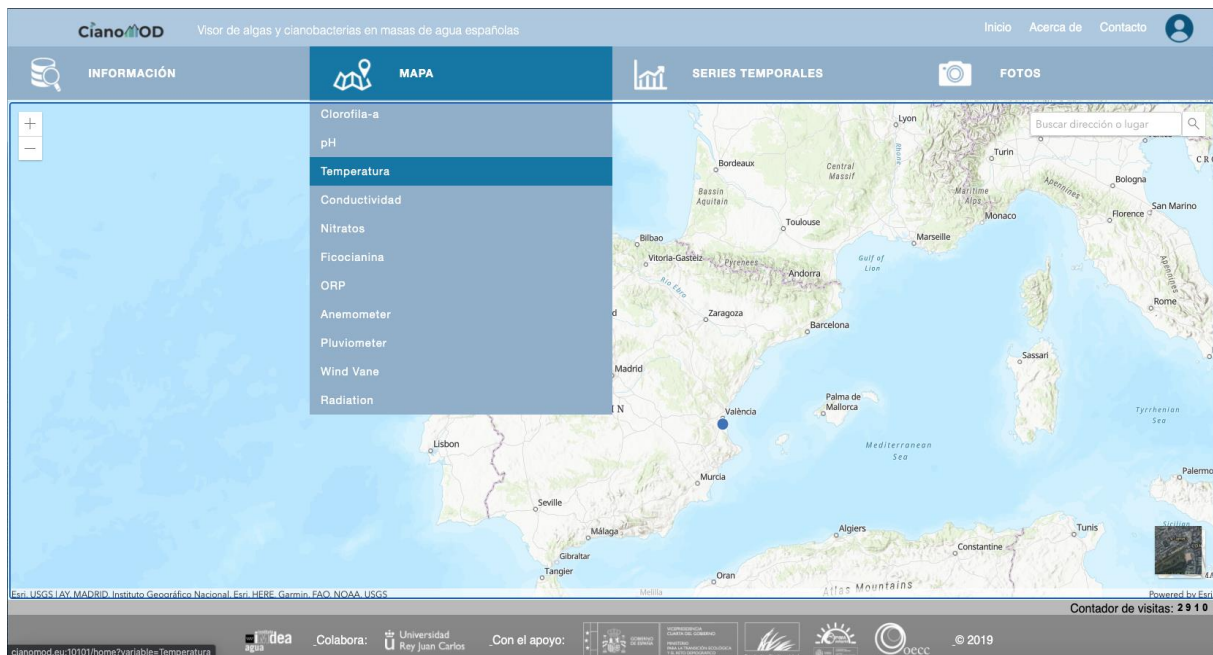


Figura 9. Desplegable de la opción de Mapa de la barra de navegación.

- Al hacer click en Fotos, se nos dirigirá a una página donde se muestra una colección de fotografías del proyecto de cada una de las ubicaciones donde se está monitorizando (figura 10).



Figura 10. Página de Fotos de la plataforma.

- Si se opta por elegir la opción “Acerca de”, situada arriba a la derecha en la página web, aparecerá la información del proyecto CIANOMOD (figura 11).



Figura 11. Página Acerca de, relativa a la información general del proyecto CIANOMOD.

- Si vamos a la opción “Contact”, situada arriba a la derecha en la página web, nos llevará a un formulario que podremos rellenar en caso de querer contactar con los responsables del proyecto (figura 12).



Figura 12. Formulario de contacto.

- Si clicamos en el icono de un usuario, situado arriba a la derecha en la página web, nos llevará a una página para el login de los usuarios administradores (figura 13).

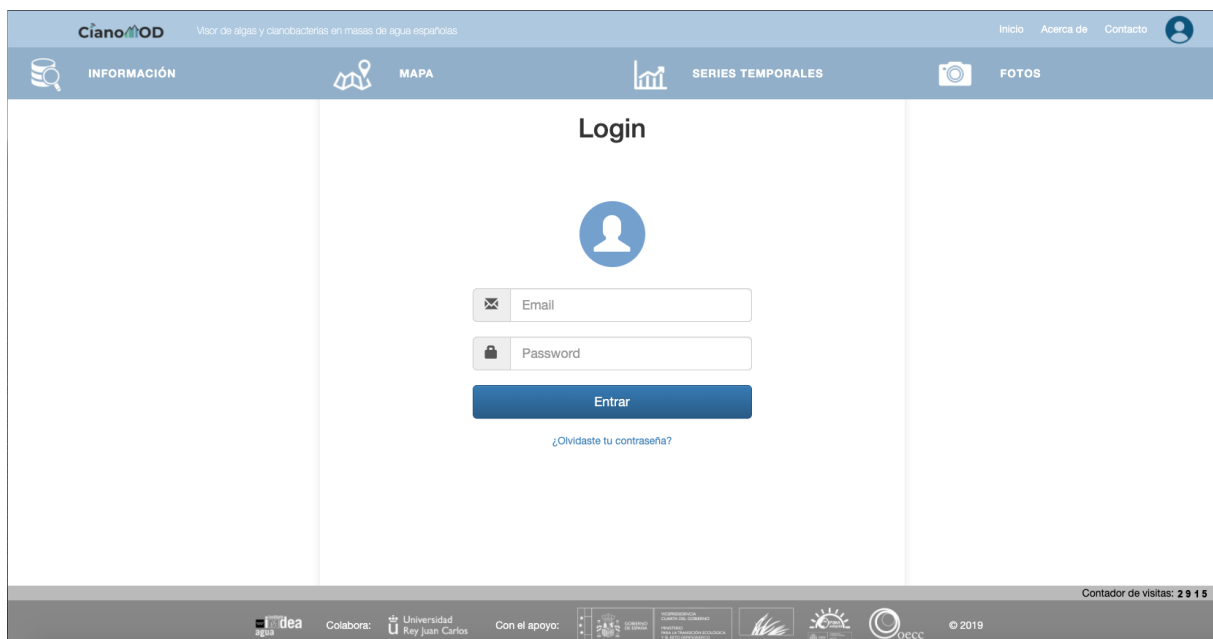


Figura 13. Login como cliente.

Si hemos introducido bien nuestro usuario nos llevará a la página de bienvenida (figura 14).



Figura 14. Confirmación de acceso del usuario administrador.

- Para poder visualizar la opción de “Series temporales”, es necesario haberse logueado como administrador o cliente. En caso de habernos logueado como cliente solo se nos mostrarán los lugares para los que estemos autorizados. En esta opción, nos irán apareciendo distintos seleccionables para poder acceder a la gráfica que queramos visualizar (figura 15).



Figura 15. Visualización de los datos de Clorofila de las Series Temporales en el Embalse As Conchas.

Gestión de usuarios, esta opción es sólo posible para los usuarios tipo administrador (figura 16).

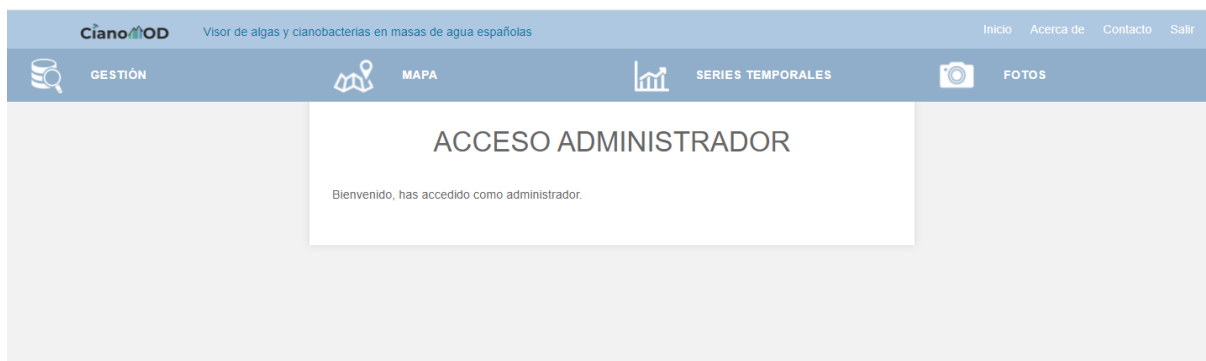


Figura 16. Login como administrador.

Al seleccionar la opción de Gestión se nos abrirá otra página donde nos vuelve a pedir el login (figura 17).

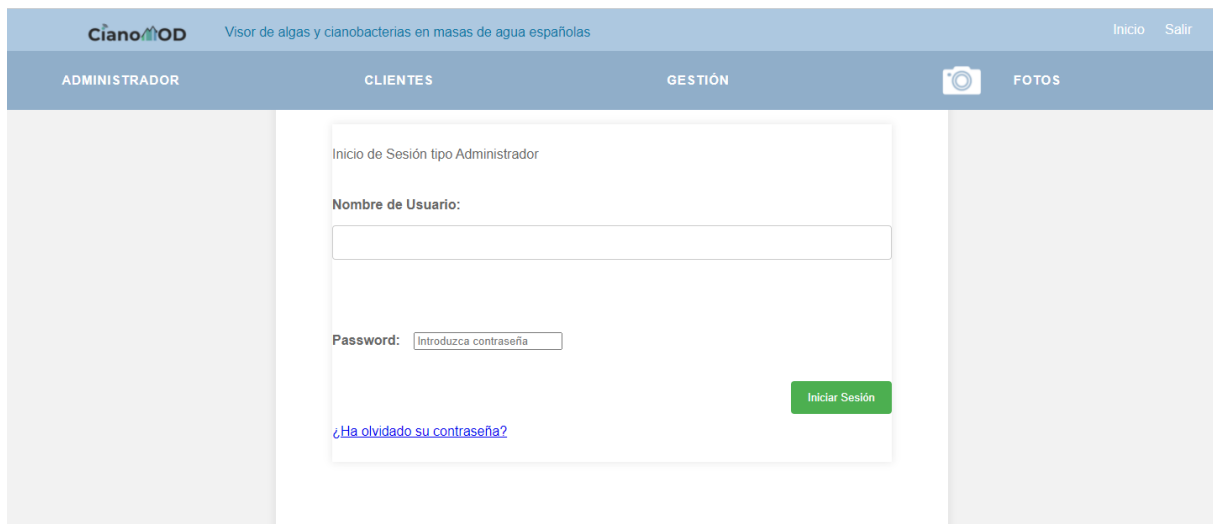


Figura 17. Login como administrador para gestión.

Para crear un nuevo administrador clicamos en “Nuevo administrador” dentro de la pestaña administrador (figura 18).



Figura 18. Administrador logeado, menú inicio.

Rellenamos el formulario con los datos y hacemos click en “Enviar” (figura 19).



Figura 19. Añadir usuario.

Si el usuario ha sido añadido correctamente se nos mostrará la siguiente pantalla (figura 20):



Figura 20. Usuario añadido correctamente.

Para visualizar a todos los administradores haremos click en “Listado administrador” (figura 21).



Figura 21. Listado administradores.

Para eliminar un usuario haremos click en el botón “Eliminar” (figura 22).



Figura 22. Administrador eliminado.

De igual manera se procede para los usuarios tipo cliente. Para gestionar los permisos de los clientes, seleccionaremos un cliente del listado haciendo click en “Ir a client” (figura 23).

Logo: CianoMOD. Visor de algas y cianobacterias en masas de agua españolas. Inicio | Salir

ADMINISTRADOR | CLIENTES | GESTIÓN | FOTOS

DATOS DISPONIBLES

Listado de usuarios:

Nombre	Apellidos	Email	Rol	
user	prueba	user@cianomod.com	2	Ir a client
user2	prueba	user2@cianomod.com	2	Ir a client

Logos: dea agua, Colabora: Universidad Rey Juan Carlos, Con el apoyo: GOBIERNO DE ESPAÑA, GOBIERNO DE LA COMUNIDAD VALENCIANA, GOBIERNO DE CASTILLA-LA MANCHA, GOBIERNO DE CASTILLA Y LEÓN, GOBIERNO DE CANTABRIA, GOBIERNO DE GALICIA, GOBIERNO DE CATALUÑA, GOBIERNO DE ARAGON, GOBIERNO DE NAVARRA, GOBIERNO DE MADRID, GOBIERNO DE BALEARES, GOBIERNO DE VALENCIA, GOBIERNO DE CASTILLA-LA MANCHA, GOBIERNO DE CASTILLA Y LEÓN, GOBIERNO DE CANTABRIA, GOBIERNO DE GALICIA, GOBIERNO DE CATALUÑA, GOBIERNO DE ARAGON, GOBIERNO DE NAVARRA, GOBIERNO DE MADRID, GOBIERNO DE BALEARES, GOBIERNO DE VALENCIA, OECC, © 2019

Figura 23. Listado cliente.

Desde aquí podremos eliminar a un cliente u otorgar/eliminar el acceso a los datos de un lugar (figura 24).

Logo: CianoMOD. Visor de algas y cianobacterias en masas de agua españolas. Inicio | Salir

ADMINISTRADOR | CLIENTES | GESTIÓN | FOTOS

Nuevo administrador
Listado administrador

AÑADIR USUARIO

Datos del cliente:

Nombre	user
Apellidos	prueba
eMail	user@cianomod.com
Eliminar usuario	<input type="button" value="Eliminar"/>

Localizaciones:

Lugar	Permiso	Acción
Embalse As Concha, Galicia	No	<input type="button" value="Permitir"/> <input type="button" value="Denegar"/>
Laguna Albufera de Valencia	No	<input type="button" value="Permitir"/> <input type="button" value="Denegar"/>

Logos: dea agua, Colabora: Universidad Rey Juan Carlos, Con el apoyo: GOBIERNO DE ESPAÑA, GOBIERNO DE LA COMUNIDAD VALENCIANA, GOBIERNO DE CASTILLA-LA MANCHA, GOBIERNO DE CASTILLA Y LEÓN, GOBIERNO DE CANTABRIA, GOBIERNO DE GALICIA, GOBIERNO DE CATALUÑA, GOBIERNO DE ARAGON, GOBIERNO DE NAVARRA, GOBIERNO DE MADRID, GOBIERNO DE BALEARES, GOBIERNO DE VALENCIA, OECC, © 2019

Figura 24. Datos cliente.

3.3.Instalación de portal web

Este manual de instalación sirve tanto para el despliegue en la nube o para el despliegue en local. Estas indicaciones se corresponden a un sistema Ubuntu 18.04 LTS. Una vez instalado este sistema, los pasos que debemos seguir ejecutándolos en un terminal son los siguientes:

1. Re-sincroniza las fuentes de los paquetes:
sudo apt-get update
2. Actualiza las aplicaciones y paquetes instalados a su última versión:
sudo apt-get upgrade
3. Instalación de máquina virtual de java:
sudo apt-get install default-jre
4. Instalación del servidor de base de datos:
sudo apt-get install mysql-server
5. Instalar mysql y crear una base de datos con el nombre wayfindingBBDD, (create database wayfindingbbdd)
sudo apt-get install mysql-server mysql-client
Contraseña: 1234
sudo apt-get install mysql-workbench
sudo mysql -h localhost -u root -p
CREATE DATABASE cianomodBBDD;
6. Instalar Eclipse STS
Descargado el STS para Eclipse en la pagina oficial
Creamos una carpeta llamada "springsource" en /home/(nombre usuario) y guardamos allí el .tar.gz
sudo tar -xvf spring-tool-suite-3.7.0.RELEASE.....tar.gz (version que nos hayamos bajado)
7. Importar maven y seleccionar webcianomod descomprimido.
8. En el proyecto de eclipse ir al archivo application.properties, en ese fichero se configura todo lo referente al proyecto, (he dejado un pantallazo en dbx con los puntos más importantes) que son la dirección de la base de datos, si al arrancar la aplicación tiene que crear las tablas (create/create-drop/none) y si tiene que introducir datos.(true/false)

Para empezar a correr el servidor damos click derecho encima de webcianomod y damos a "restart", empezará a correr el programa y se crearán las tablas de la base de datos. Una vez arrancada correctamente saldrá una flecha verde delante (figura 25).

Para conectarse a CIANOMOD después de arrancarla //localhost:10101

Para la parte de gestión de usuarios vamos a seguir los siguientes pasos:

1. Instalación de la python:
sudo apt-get install python-software-properties
2. Instalación de la máquina virtual de java:
sudo apt-get install openjdk-8-jdk openjdk-8-jre
Descargamos la versión de java jdk 8u261 para Linux del siguiente enlace:
<https://www.oracle.com/es/java/technologies/javase/javase-jdk8-downloads.html>
Seleccionamos el archivo para Linux x64 Compressed Archive:
jdk-8u261-linux-x64.tar.gz
Descomprimimos el archivo y lo pegamos dentro de ../../Library/Java
3. Instalación del servidor de base de datos:
sudo apt-get install mysql-server mysql-client
sudo apt install mysql-workbench

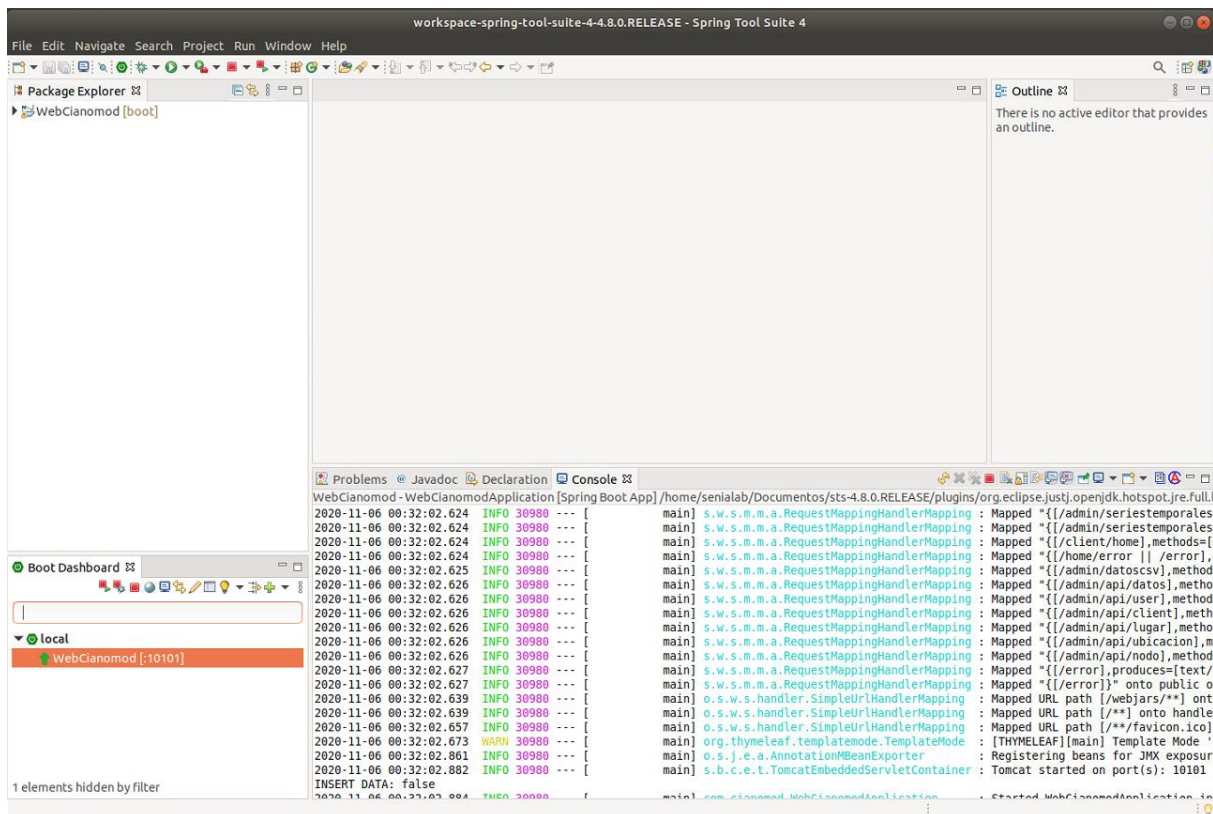


Figura 25. Ventana para la ejecución del servidor.

4. Instalación de Glassfish 4:

```
cd /tmp/
wget http://download.java.net/glassfish/4.1/release/glassfish-4.1.zip
unzip glassfish-4.1.zip -d /opt/
sudo chmod -R 777 /opt/glassfish4
sudo nano /opt/glassfish4/glassfish/config/asenv.conf
```

Añadimos la siguiente línea al final del archivo:

```
AS_JAVA=../../../../../Library/Java/JavaVirtualMachines/jdk1.8.0_261.jdk/Contents/
Home
```

5. Arrancamos Glassfish:

```
cd /opt/glassfish4/bin
./asadmin start-domain
```

Nota: Si queremos parar el servidor web:

```
cd /opt/glassfish4/bin
./asadmin stop-domain
```

Hasta aquí tendríamos los paquetes necesarios para poder cargar nuestra aplicación instalados.

Para cargar la aplicación seguimos los siguientes pasos:

6. Accedemos a glassfish a través del navegador web:

<http://localhost:4848> o <http://direccion-ip-servidor:4848>

7. Clicamos en Applications y seleccionamos la opción Deploy... (figura 26)

8. Seleccionamos la opción seleccionar archivo:

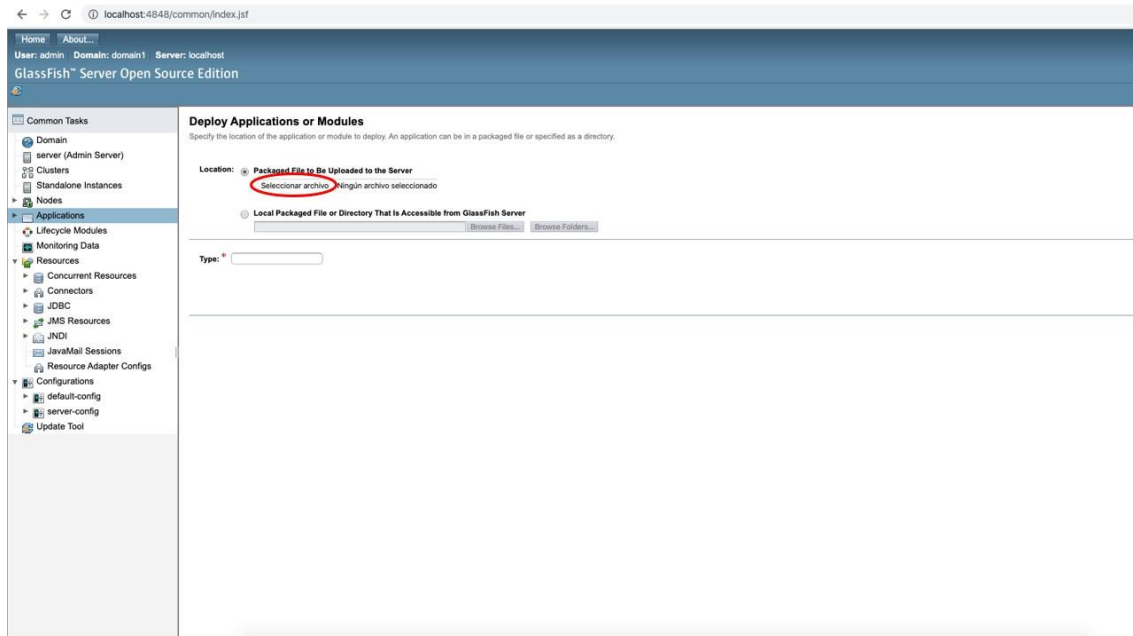


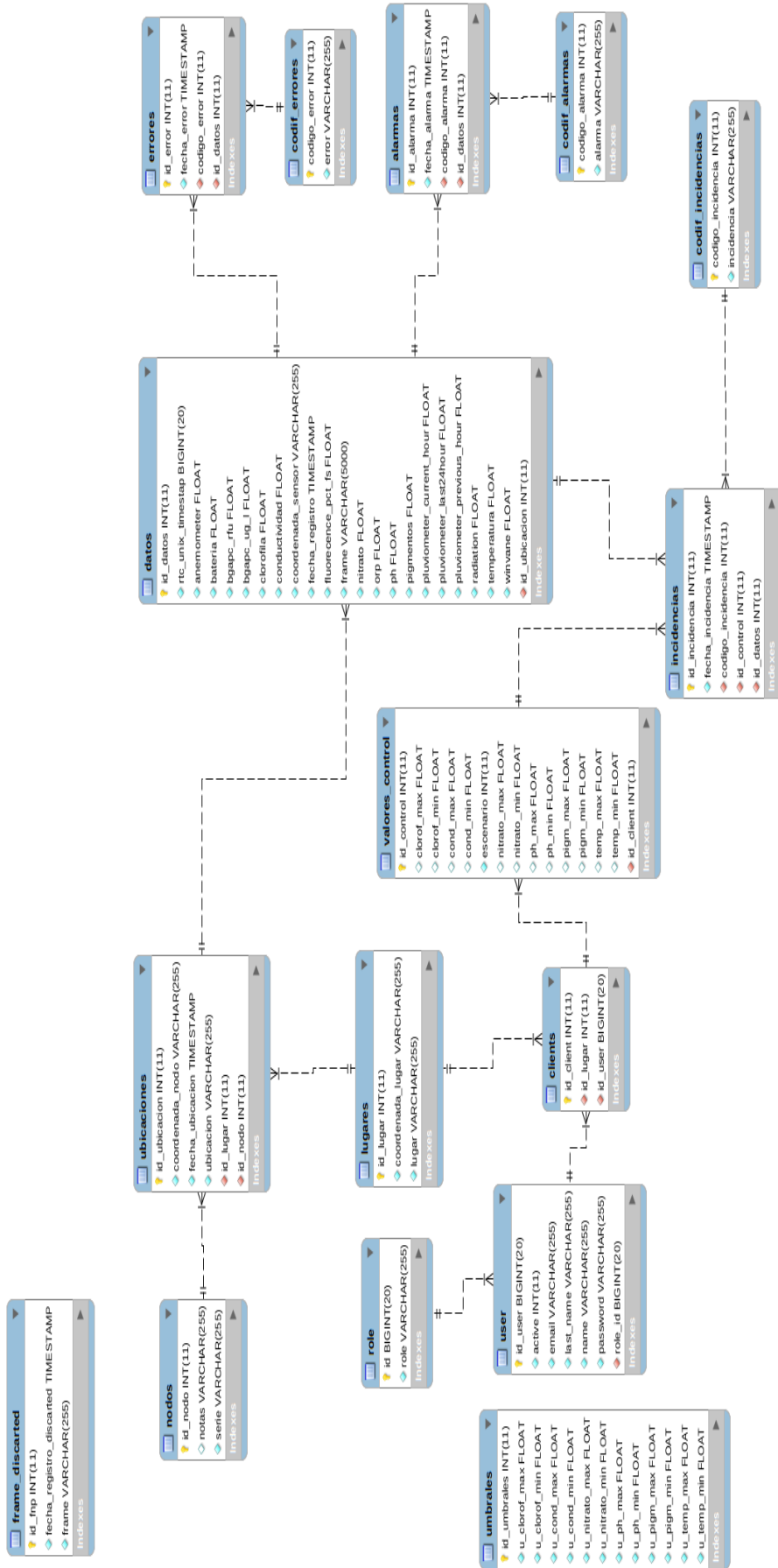
Figura 26. Acceso a glassfish.

9. Cargamos el archivo cianomod_admin.war

Una vez finalizado, tendríamos cargada nuestra plataforma en el servidor web. Para acceder a ellas abrimos el navegador y escribimos:

http://ip-servidor:8080/cianomod_admin

ANEXO – DIAGRAMA E/R



D. Consideraciones finales

A.1. Exploración y uso de series históricas de datos

El análisis exploratorio permite extraer las características de la información. En el caso del análisis de datos climáticos y de la calidad del agua de estaciones meteorológicas cercanas al embalse de As Conchas y la Albufera de Valencia y de puntos de muestreo de calidad de agua localizados en ambas masas de agua muestra que, a pesar de la posible disparidad de técnicas de muestreo y recogida de datos inherentes a la naturaleza de los datos recogidos (climáticos y de calidad del agua), puede hacerse una estrategia analítica que establezca la idoneidad de los datos para ser analizados.

Si bien, no siempre pueden encontrarse registros que coincidan con la serie temporal de referencia, en ambas masas de agua podría realizarse un análisis de tendencias históricas de los últimos 10 años. De igual manera, puede llegar a obtenerse un conjunto mínimo de datos climáticos y de calidad del agua, coincidentes temporalmente que permita relacionar sus características con el potencial de afloramiento de cianobacterias.

Los datos climáticos de referencia se deben obtener de la estación más cercana. Sin embargo, ambas se encuentran a varios kilómetros de distancia del punto más próximo de la masa de agua (7,3 km en la Albufera de Valencia y 4,7 en el embalse de As Conchas). Sería aconsejable que se instrumentalizaran sistemas de medición de datos meteorológicos propios para las masas de agua, de manera que pudieran obtenerse registros históricos donde la distancia no supusiera una posibilidad de incertidumbre.

Durante los 10 años de estudio, los datos de calidad de agua son relativamente consistentes durante la época estival, pero inconsistentes el resto del año, particularmente en la laguna de la Albufera de Valencia. La presencia de varios puntos de muestreo en cada masa de agua da valor a los datos recogidos, pero al carecer de una frecuencia de recogida constante, imposibilita realizar análisis más exhaustivos con las series temporales recogidas y, por tanto, obtener conclusiones de mayor relevancia. Esto es evidente en la Albufera de Valencia, donde los afloramientos de algas y cianobacterias son más variables e intensos a lo largo del tiempo.

Por último, en base a los umbrales de alerta recomendados por la OMS, ambas masas de agua presentan vulnerabilidad al riesgo asociado a la presencia de algas y cianobacterias. En concreto, la alerta de nivel 1 fue constante y se alcanzó durante todos los años de estudio. Estos resultados contrastan con el bajo número de muestras de clorofila A recogidas en días diferentes. De esta forma, es recomendable aumentar la frecuencia de muestreo en ambas masas de agua para evitar largas temporadas de incertidumbre al riesgo y, por lo tanto, la implementación de sistemas de monitorización en tiempo real podrían ser una solución eficaz.

A.2. La aplicación de Sistemas de Información Geográfica para el análisis contextual basado en la dinámica espacio-temporal de los usos del suelo

Con el análisis y la dinámica de las coberturas de suelo a lo largo del tiempo (LUCC), el modelo geoespacial para la generación de escenarios nos permite relacionar los parámetros de calidad de aguas con la evolución de las coberturas del suelo.

De esta forma, los escenarios futuros obtenidos con el modelo nos permitirán obtener escenarios de calidad de aguas relacionados con las tendencias históricas en de las coberturas de suelo y sus escenarios futuros.

De igual manera, pueden relacionarse las tendencias, mantenimiento éstas más estables en el área de As Conchas y con reducción en el de la Albufera de Valencia de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo y las tendencias en la calidad de las aguas.

El comportamiento del modelo representa las condiciones de los usos del suelo en los momentos históricos analizados. Esas condiciones son las que determinan las proyecciones de futuro, por lo que debe pensarse que el dinamismo establecido en un área será necesariamente distinto al que se observe en otra, pues las condiciones a lo largo del tiempo serán también distintas.

La conexión de la dinámica de los usos del suelo con variables hídricas permita evaluar las tendencias temporales de su cantidad como de su calidad. Dependiendo la fiabilidad de los resultados de la calidad inicial de la información y, también, de la consistencia de los métodos analíticos empleados.

En este caso la generación y uso de datos de calidad y fiables es una necesidad prácticamente ineludible. En el caso del estudio de las masas de agua cuyas características pueden variar de unas a otras, sería recomendable establecer redes para la obtención de datos armonizados que permitieran su evaluación continua y análisis comparativos entre ellas.

A.3. Uso de la teledetección para la evaluación de las masas de agua

La experiencia y resultados obtenidos en éste estudio piloto, en el que se ha evaluado la detección y monitorización de blooms de cianobacterias, con medidas de concentraciones de clorofila-a con datos *in situ* con Sonda y técnicas de detección remota con imágenes de satélite Sentinel-2 y Landsat8, muestran que es un sistema con potencial pero que requiere del desarrollo de modelos empíricos específicos para cada zona de estudio o masa de agua.

Éstos nuevos algoritmos requieren de una mejora en los ajustes de los parámetros de calibración integrando otras fuentes de datos y especialmente las validaciones *in situ* y las correcciones atmosféricas de las imágenes para asegurar la precisión de las observaciones.

Los resultados indican que existe una relación baja entre las medidas de concentración de clorofila-a medida con la sonda y los valores de reflectividad medidos con imágenes de satélite para los procedimientos metodológicos considerados. Mientras que el algoritmo de Shafique, se desarrolló en masa de aguas oceánicas, donde el fitoplancton es fácil de relacionar empíricamente con la reflectancia en las bandas espectrales del azul y verde visible. En el caso de las aguas continentales son más complejas ópticamente por la presencia de un número mayor de componentes, como los sedimentos y, por tanto, la concentración de clorofila-a no se puede calcular de forma precisa a partir de las reflectividad de las bandas azul, verde e infrarrojo. El caso del modelo C2RCC, los parámetros para las correcciones atmosféricas son fundamentales para obtener ajustes y resultados más precisos.

A pesar de las limitaciones que ya hemos identificado, las técnicas de teledetección nos permiten tener una visión espacial y temporal de la evolución cualitativa de la concentración de clorofila-a en las masas de aguas continentales. Además, estas técnicas empleadas destacan por ser un método rápido y de bajo coste, ya que el acceso a las imágenes y el software para procesarlas y analizarlas es gratuito, aunque requieran de especialización de técnicos.

La integración de éstos sistemas con las misiones de satélite Landsat 8 y Sentinel 2, constituyen una mejora relevante en el funcionamiento y operatividad de un sistema como el que se propone en CianoMOD

El algoritmo de Shafique, se desarrolló en masa de aguas oceánicas donde el fitoplancton es el constituyente primario y, por lo tanto, el fitoplancton es más fácil de relacionar empíricamente (a través de fórmulas con coeficientes que se encontraron experimentalmente) con la reflectancia en las bandas espectrales del azul y verde visible. En el caso de las aguas continentales son más complejas ópticamente por la presencia de un número mayor de componentes, como los sedimentos y, por tanto, la concentración de clorofila-a no se puede calcular de forma precisa a partir de las reflectividad de las bandas azul, verde e infrarrojo.

Las correcciones atmosféricas que se aplican a las imágenes de satélite para eliminar el efecto del polvo, vapor de agua o aerosoles, influyen de forma directa en los resultados, lo que hace necesario aplicar modelos de corrección más precisos tipo MODTRAN para mejorar los ajustes.

En el caso de las masas de agua con alta carga de materia orgánica disuelta y materia suspendida total, modifican la línea de fluorescencia por lo que se requiere de más puntos de medida para la verificación in situ.

Consideramos que los sistemas Sentinel 2 y Landsat 8 tienen la resolución espacial suficiente para la detección remota de la Clorofila-a, y la combinación de ambas misiones presenta un tiempo de revisión suficiente para la monitorización de éstos eventos.

En cuanto a las acciones mejorar la detección y monitorización de la clorofila-a para monitoreo de los blooms de cianobacterias, proponemos:

Incorporar métodos de corrección atmosférica avanzados y más precisos tales como MODTRAN o FLASS que requieren de metadatos y datos atmosféricos indispensables para poder aplicar la corrección atmosférica.

Aumentar considerablemente el número de observaciones con datos de concentración de clorofila-a, incluyendo más puntos de las zonas piloto y alargando la serie temporal.

Incluir modelos integrados que utilizan parámetros adicionales como la temperatura de la masa de agua, turbidez, sólidos en suspensión, o modelos de viento y corrientes que condicionan las características ópticas de las aguas y la formación de la proliferación de algas. La integración con otras fuentes de datos y especialmente las validaciones in situ puede aumentar la precisión de las observaciones.

La incorporación al sistema de monitorización de otros sensores como Sentinel-3 que, aunque tienen menos resolución espacial (300 metros) aumentan la resolución espectral y temporal. En el caso de las imágenes satelitales de radar, existen metodologías para la detección de proliferación de algas en el medio marino que se pueden aplicar a masa de aguas continentales.

B.1. Redes de sensores de medición continua de parámetros de calidad del agua relacionados con la potencial presencia de cianobacterias. El sistema de monitorización del proyecto CianoMOD

La infraestructura desarrollada, como canal de entrada de datos (WSN + Nube), en el proyecto CianoMOD aporta los recursos necesarios para el correcto seguimiento de los parámetros claves relacionados con los afloramientos masivos de cianobacterias en ambas zonas de estudio.

Los nodos YSI demuestran ser sistemas robustos y fiables en sus mediciones, los cuales pueden proporcionar los datos necesarios para el desarrollo de los modelos predictivos.

Por otro lado, los nodos Libelum ofrecen un sistema de apoyo el cual permite generar redundancia en los datos, así como ampliar los puntos de muestro por zona bajo estudio debido a su menor precio.

Por lo tanto, el proyecto CianoMOD implementa una red de sensores híbrida entre nodos YSI y Libelium, la cual permitirá estudiar amplias zonas de muestreo y obtener una alta cantidad de datos generando así, luego de su estudio con herramientas matemáticas, un sistema predictivo de alerta robusto y fiable.

Debe tenerse en cuenta que, debido a la resolución temporal de las mediciones (intervalos de cada 15 minutos), se produce una gran cantidad de registros en bruto. Por ejemplo, en un año de 365 días se recogerían 35040 mediciones para un solo parámetro. Esta recurrencia permite hacer análisis detallados de la evolución diaria, estacional y anual de las distintas variables instaladas y de las relaciones existentes entre ellas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las mediciones no están exentas de la posibilidad de que se detengan debido a distintas circunstancias como el deterioro de algunos de los instrumentos implementados en las boyas, circunstancias meteorológicas adversas e incluso acciones no deseadas por personas ajenas a las boyas.

Para minimizar el impacto producido por algunas de estas circunstancias se hace necesario el control y supervisión permanente de los registros y del buen estado de las señales recibidas y la instalación replicada de las boyas para que, en el caso de un silencio en la emisión de una de ellas, siga recibiendo información por la otra.

B.2. Sistemas abiertos para la consulta de datos en tiempo real en Internet

La creación de plataformas que permitan la consulta de información existente sobre propiedades medioambientales es un recurso novedoso y habitual en Internet. Se puede considerar que, dependiendo de los fines perseguidos, la exposición de los contenidos y la arquitectura de las plataformas que se construyan para acceder en la WEB son los elementos fundamentales que deben tenerse en cuenta en su construcción.

En el proyecto CianoMOD se ha intentado crear un entorno sencillo de consulta de las características del proyecto y de acceso a la información relacionada con información de calidad del agua y características climáticas de dos masas de agua distintas. Así mismo, si bien puede accederse a la consulta en tiempo real de los valores medidos por los sensores, para otro tipo de acceso a la página WEB y, sobre todo, para la descarga de los datos se organiza en distintos niveles de usuarios.

Al tratarse de un prototipo, se debe tener en cuenta algunos aspectos que permitirían mayor estabilidad de la página WEB, como su alojamiento permanente en servidores rápidos y estables con un dominio permanente.

En la actualidad sólo se ha desarrollado para la incorporación de información proveniente de dos masas de agua en las que cada una tiene instalados cinco sistemas de recogida de datos. El desarrollo de la página WEB prevé el potencial incremento del número de masas de agua y sensores a incorporar, lo que conllevaría una ampliación de contenidos y redimensionar los sistemas de lectura, almacenamiento y consulta de los datos, incluyendo la posibilidad de incorporar sistemas de evaluación del estado de la calidad de las masas de agua en tiempo real.

Bibliografía consultada

Introducción

- Beaulieu, M., Pick, F., Gregory-Eaves, I. (2013): Nutrients and water temperature are significant predictors of cyanobacterial biomass in a 1147 lakes data set. *Limnol. Oceanogr.* 58, 1736–1746. <https://doi.org/10.4319/lo.2013.58.5.1736>
- Brasier, M.D., Green, O.R., Jephcoat, A.P., Kleppe, A.K., Kranendonk, M.J. Van, Lindsay, J.F., Steele, A., Grassineau, N. V. (2002): Questioning the evidence for Earth ' s oldest fossils. *Nature* 416, 76–81.
- Carrasco, D., Moreno, E., Sanchis, D., Wörmer, L., Cueto, A. Del, Quesada, A., Carrasco, D., Moreno, E., Sanchis, D., Wörmer, L., Carrasco, D., Moreno, E., Sanchis, D., Wo, L. (2007): Cyanobacterial abundance and microcystin occurrence in Mediterranean water reservoirs in Central Spain : microcystins in the Madrid area Cyanobacterial abundance and microcystin occurrence in Mediterranean water reservoirs in Central Spain : microcystins 0262. <https://doi.org/10.1080/09670260600801724>
- Chorus, I., Welker, M. (Eds.) (2021): Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management, 2nd ed, CRC Press, Boca Raton (FL), on behalf of the World Health Organization, Geneva, CH. Taylor & Francis, London. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003081449>
- Conley, D.J., Paerl, H.W., Howarth, R.W., Boesch, D.F., Seitzinger, S.P., Havens, K.E., Lancelot, C., Likens, G.E. (2009): Controlling Eutrophication: Nitrogen and Phosphorus. *Science* (80-). 323.
- Delgado Huertas, A. (2013): Actuaciones para la cuantificación del origen de la contaminación difusa por presencia de nitratos en la cuenca del río Límia mediante la realización de un estudio isotópico, Laboratorio de Biogeoquímica de Isótopos Estables, Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR). Consejo Superior de Investigaciones Científicas Granada.
- Gobler, C.J., Burkholder, J.M., Davis, T.W., Harke, M.J., Johengen, T., Stow, C.A., Waal, D.B. Van De (2016): The dual role of nitrogen supply in controlling the growth and toxicity of cyanobacterial blooms. *Harmful Algae* 54, 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2016.01.010>
- Hamilton, D.P., Wood, S.A., Dietrich, D.R., Puddick, J. (2013): Costs of harmful blooms of freshwater cyanobacteria. *Cyanobacteria An Econ. Perspect.* 245–256. <https://doi.org/10.1002/9781118402238.ch15>
- Harke, M.J., Steffen, M.M., Gobler, C.J., Otten, T.G., Wilhelm, S.W., Wood, S. a., Paerl, H.W. (2016): A review of the global ecology, genomics, and biogeography of the toxic cyanobacterium, *Microcystis* spp. *Harmful Algae* 54, 4–20. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2015.12.007>
- Huisman, J., Codd, G.A., Paerl, H.W., Ibelings, B.W., Verspagen, J.M.H., Visser, P.M. (2018): Cyanobacterial blooms. *Nat. Rev. Microbiol.* 16, 471–483. <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0040-1>
- Ibelings, B.W., Vonk, M., J Los, H.F., Van Der Molen, D.T., Mooij, W.M. (2003): Fuzzy modeling of cyanobacterial surface waterblooms: validation with NOAA-AVHRR satellite images. *Ecol. Appl.* 13, 1456–1472.
- Malthus, T.J., Lehmann, E., Ho, X., Botha, E., Anstee, J. (2019): Implementation of a satellite based inland water algal bloom alerting system using analysis ready data. *Remote Sens.* 11. <https://doi.org/10.3390/rs11242954>

- Mantzouki, E. (2018): Temperature effects explain continental scale distribution of cyanobacterial toxins. *Toxins* (Basel). 10, 1–24. <https://doi.org/10.3390/toxins10040156>
- Mishra, D.R., Kumar, A., Ramaswamy, L., Boddula, V.K., Das, M.C., Page, B.P., Weber, S.J. (2020): CyanoTRACKER: A cloud-based integrated multi-platform architecture for global observation of cyanobacterial harmful algal blooms. *Harmful Algae* 96, 101828. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2020.101828>
- Monchamp, M.E., Pick, F.R., Beisner, B.E., Maranger, R. (2014): Nitrogen forms influence microcystin concentration and composition via changes in cyanobacterial community structure. *PLoS One* 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085573>
- Oyama, Y., Matsushita, B., Fukushima, T. (2016): Cyanobacterial Blooms as an Indicator of Environmental Degradation in Waters and Their Monitoring Using Satellite Remote Sensing, in: Nakano, S. -i. (Ed.), *Ecological Research Monographs*. Springer Science+Business Media, Singapore, pp. 31–39. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0780-4>
- Pace, M.L., Batt, R.D., Buelo, C.D., Carpenter, S.R., Cole, J.J., Kurtzweil, J.T., Wilkinson, G.M. (2017): Reversal of a cyanobacterial bloom in response to early warnings. *PNAS* 114, 352–357. <https://doi.org/10.1073/pnas.1612424114>
- Paerl, H.W., Huisman, J. (2008): Blooms like it hot. *Science* 320, 57–58. <https://doi.org/10.1126/science.1155398>
- Paerl, H.W., Scott, J.T., McCarthy, M.J., Newell, S.E., Gardner, W.S., Havens, K.E., Hoffman, D.K., Wilhelm, S.W., Wurtsbaugh, W.A. (2016): It Takes Two to Tango: When and Where Dual Nutrient (N & P) Reductions Are Needed to Protect Lakes and Downstream Ecosystems. *Environ. Sci. Technol.* 50, 10805–10813. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02575>
- Quesada, A., Sanchis, D., Carrasco, D. (2004): Cyanobacteria in Spanish reservoirs. How frequently are they toxic? *Limnetica* 23, 109–118.
- Reynolds, C.S. (2006): *Ecology of Phytoplankton*.
- Rigosi, A., Carey, C.C., Ibelings, B.W., Brookes, J.D. (2014): The interaction between climate warming and eutrophication to promote cyanobacteria is dependent on trophic state and varies among taxa. *Limnol. Oceanogr.* 59, 99–114. <https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.01.0099>
- Roegner, A.F., Brena, B., González-sapienza, G., Puschner, B. (2013): Microcystins in potable surface waters: toxic effects and removal strategies. <https://doi.org/10.1002/jat.2920>
- Romo, S., Garc, A. (2008): Tendencias del fitoplancton en el lago de la Albufera de Valencia e ´ y recuperaci on ´ A implicaciones para su ecolog ´ ia , gesti on e Villena , Vicent S ´ anchez y Alma Ballester 27.
- Sanseverino, I., Conduto, D. (2016): Algal bloom and its economic impact. <https://doi.org/doi:10.2788/660478>
- Sarma, T.A. (2013): *Handbook of Handbook of of Handbook Cyanobacteria Cyanobacteria Cyanobacteria*.
- Schindler, D.W., Carpenter, S.R., Chapra, S.C., Hecky, R.E., Orihel, D.M. (2016): Reducing Phosphorus to Curb Lake Eutrophication is a Success. *Enviromental Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02204>

- Shi, K., Zhang, Y., Zhou, Y., Liu, X., Zhu, G., Qin, B. (2017): Long-term MODIS observations of cyanobacterial dynamics in Lake Taihu : Responses to nutrient enrichment and meteorological factors. *Sci. Rep.* 1–16. <https://doi.org/10.1038/srep40326>
- Soria, J.M. (2006): Past, present and future of la Albufera of Valencia Natural Park. *Limnetica* 25, 135–142. <https://doi.org/10.23818/limn.25.10>
- Tonk, L., Bosch, K., Visser, P., Huisman, J. (2007): Salt tolerance of the harmful cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*, *Aquatic Microbial Ecology*. <https://doi.org/10.3354/ame046117>
- Xu, H., Paerl, H.W., Qin, B., Zhu, G., Gao, G. (2010): Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnol. Oceanogr.* 55, 420–432. <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.1.0420>
- Yang, J., Holbach, A., Wilhelms, A., Qin, Y., Zheng, B., Zou, H., Qin, B., Zhu, G., Norra, S. (2019): Highly time-resolved analysis of seasonal water dynamics and algal kinetics based on in-situ multi-sensor-system monitoring data in Lake Taihu, China. *Sci. Total Environ.* 660, 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.044>
- Zohary, T., Robarts, R.D. (1990): Hyperscums and the population dynamics of *microcystis-aeruginosa*. *J Plankt. Res* 12, 423–432.

Capítulo A.1.

- Carrasco Gata, D. (2007): Cianobacterias planctónicas y cianotoxinas en embalses españoles. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología.
- Chorus, I., Welker, M. (Eds.) (2021): *Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management*, 2nd ed, CRC Press, Boca Raton (FL), on behalf of the World Health Organization, Geneva, CH. Taylor & Francis, London. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003081449>
- Delegido, J.; Urrego, P.; Vicente, E.; Sòria-Perpinyà, X.; Soria, J.M.; Pereira-Sandoval, M.; Ruiz-Verdú, A.; Peña, R.; Moreno, J. (2019): Turbidez y profundidad de disco de Secchi con Sentinel-2 en embalses con diferente estado trófico en la Comunidad Valenciana. *Revista de Teledetección*, 54: 15-24.
- Errejón, J.A. (Coordinador) (2010): *Evaluación de la Gestión y Funcionamiento de las Confederaciones Hidrográficas*. Ministerio de la Presidencia. Agencia Estatal de Evaluación de las Políticas Públicas y la Calidad de los Servicios.
- Fanning, S., Kriek, K., Hollis Weber, J., Herrera, R., Palacios, C., Sanz Cabrero, J.C. (s.f.): Libre Office, Guía de Calc, Capítulo 8-Usar tablas dinámicas. <https://documentation.libreoffice.org/assets/Uploads/Documentation/es/Calc-62/PDF/CG6208-TablasDinamicas.pdf>
- González Gómez, J.I. (s.f.): *Tablas dinámicas (I). Fundamentos, funciones esenciales y otros aspectos relacionados con las tablas dinámicas*. Departamento de Economía Financiera y Contabilidad. Universidad de la Laguna. <http://jggomez.eu/k%20Informatica/3%20Excel/03%20Mis%20Temas/B%20B D%20y%20TD/TD%20I.pdf>
- Grossman, A.R.; Schaefer, M.R.; Chiang, G.G.; Collier, J L. (1994): The responses of cyanobacteria to environmental conditions: light and nutrients, p. 641-675. En D. A. Bryant (ed.), *Advances in photosynthesis: the molecular biology of cyanobacteria* Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands.

- Kim, S.; Chung, S.; Park, H.; Cho, Y.; Lee, H. (2019): Analysis of environmental factors associated with cyanobacterial dominance after river weir installation. *Water*, 11 (6): 1163.
- Loza Calvo, V. (2011): Biodiversidad de cianobacterias en ríos de la comunidad de Madrid. Análisis polifásico y aplicación en biomonitorización. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología.
- Ministry of Health (1995): Chapter 9: Cyanobacterial compliance. En Ministry of Health, Guidelines for drinking water quality management for New Zealand. New Zealand Ministry of Health.
- Molina López, J.M.; García Herrero, J. (2006): Técnicas de análisis de datos.
- Paerl, H.W., Scott, J.T., McCarthy, M.J., Newell, S.E., Gardner, W.S., Havens, K.E., Hoffman, D.K., Wilhelm, S.W., Wurtsbaugh, W.A. (2016): It Takes Two to Tango: When and Where Dual Nutrient (N & P) Reductions Are Needed to Protect Lakes and Downstream Ecosystems. *Environ. Sci. Technol.* 50, 10805–10813. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02575>
- Pascual Aguilar, J.A.; Campo, J.; Nebot Meneu, S.; Gimeno-García, E.; Andreu, V. (2019): Analysis of existing water information for the applicability of water quality indices in the fluvial-littoral area of Turia and Júcar Rivers, Valencia, Spain. *Applied Geography*, 111.
- QIGS (s.f.): Guía/Manual de Usuario (QGIS 3.10). https://docs.qgis.org/3.10/es/docs/user_manual/index.html#
- Subdirección General de Aire Limpio y Sostenibilidad Industrial (2019): Evaluación de la Calidad del Aire en España 2019. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- Wang, J.H.; Wang, Y.A.; Dao, G.H.; Du, J.S.; Han, Y.P.; Hu, H.Y. (2020). Decade-long meteorological and water quality dynamics of northern Lake Dianchi and recommendations on algal bloom mitigation via key influencing factors identification. *Ecological Indicators*, 115: 106425.
- Wiki.openoffice.es (s.f.): Tablas dinámicas en OpenOffice Calc (El piloto de datos) https://wiki.open-office.es/Tablas_dinamicas_en_OpenOffice_Calc

Capítulo A.2.

- Belda-Carrasco, R., Iranzo-García, E. Pascual Aguilar, J.A. (2019): “Landscape Dynamics in Mediterranean Coastal Areas: Castelló de La Plana in the Last Hundred Years.” *Landscape Online* 69 (June): 1–15. <https://doi.org/10.3097/LO.201969>.
- Büttner, G., Kosztra, B. (2011): “Manual of CORINE Land Cover Changes.” European Environment Agency.
- Centro de Sensoriamento Remoto (CSR/UFGM) (2018): “Dinamica EGO.” Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. <http://csr.ufmg.br/dinamica/>.
- Copernicus. (2017): “Copernicus, Land Monitoring Service, Pan - European.” 2017. <http://land.copernicus.eu/pan-european>.
- Gutián Ojea, F., Carballas, T. (1982): Suelos Naturales de La Provincia de Orense. Santiago de Compostela: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia.
- Guo, Q.H., Ma, K.M., Yang, L., He, K. (2010): “Testing a Dynamic Complex Hypothesis in the Analysis of Land Use Impact on Lake Water Quality.” *Water Resources Management* 24 (7): 1313–32. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9498-y>.

- Hung, C.L.J., James, L.A., Carbone, G.J., Williams, J.M. (2020): "Impacts of Combined Land-Use and Climate Change on Streamflow in Two Nested Catchments in the Southeastern United States." *Ecological Engineering* 143 (January): 105665. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105665>.
- Instituto Geográfico Nacional (2018): "Centro de Descargas Del CNIG (IGN)." 2018. <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp#>.
- Instituto Geológico y Minero de España (2017): "Catálogo de Información Geocientífica Del IGME Cartografía." 2017. <http://www.igme.es/>.
- IUSS Working Group WRB (2015): "World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015 International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps." Rome. <http://www.fao.org/3/i3794en/i3794en.pdf>.
- Langanke, T. (2016): "Copernicus Land Monitoring Service-High Resolution Layer Imperviousness: Product Specificatio." <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/hrl-imperviousness-technical-document-prod-2015>.
- Łaszewski, M., Fedorczyk, M., Gołaszewska, S., Kieliszek, Z., Maciejewska, P., Miksa, J., Zacharkiewicz, W. (2021): "Land Cover Effects on Selected Nutrient Compounds in Small Lowland Agricultural Catchments." *Land* 10 (2): 1–20. <https://doi.org/10.3390/land10020182>.
- Matysik, M., Absalon, D., Habel, M., Maerker, M. (2020): "Surface Water Quality Analysis Using CORINE Data: An Application to Assess Reservoirs in Poland." *Remote Sensing* 12 (6): 16–20. <https://doi.org/10.3390/rs12060979>.
- Norton, L., Elliott, J.A., Maberly, S.C., May, L. (2012): "Using Models to Bridge the Gap between Land Use and Algal Blooms: An Example from the Loweswater Catchment, UK." *Environmental Modelling and Software* 36 (October): 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.011>.
- Pascual Aguilar, J.A., Sanz García, J., de Bustamante Gutierrez. I. (2011): "Using Environmental Metrics to Describe the Spatial and Temporal Evolution of Landscape Structure and Soil Hydrology and Fertility." In *Spatial2: Spatial Data Methods for Environmental and Ecological Processes*, edited by Barbara Cafarelli, 1–5. Foggia: The International Environmetrics Society - TIES. <https://doi.org/978-88-96125-12-3>.
- Rodrigues, H., Soares-Filho, B. (2018): "A Short Presentation of Dinamica EGO." In *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*, edited by María Teresa Camacho Olmedo, Martin Paegelow, Jean-François Mas, and Francisco Escobar, 493–98. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_35.
- Rubio Delgado, J.L., Sánchez Díaz, J., Forteza Bonnin, J. (1996): "Mapa de Suelos de La Comunidad Valenciana, Proyecto Lucdeme: Valencia (722)." Valencia: Generalitat Valenciana. Conselleria d'Agricultura i Medi Ambient. http://trob.es/record=b1209566~S1*val.
- Trueba, C., Millán, R., Schmid, T., Roquero, C., Magister, M. (1995): "Base de Datos de Propiedades Edafológicas de Los Suelos Españoles. Volumen I. Galicia." Madrid.

Capítulo A.3.

- Anspér, A.; Alikas, K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes. *Remote Sens.* 2019, 11, 64. <https://doi.org/10.3390/rs11010064>.

- Cirerol, N. A. Eutrofización y Calidad del Agua de una Zona Costera Tropical. (2004).
- Copernicus. Copernicus Open Access Hub. European Space Agency (2018).
- Domínguez Gómez, J. A., Marcos Martín, C., Chao Rodríguez, Y., Delgado Rojas, G. & Rodríguez Pérez, D. Estudio de aguas continentales mediante teledetección. UNED Ciencias (2011).
- Donato, A. Análisis de Harmful Algal Blooms en Masas de Aguas Continentales Aplicando Técnicas de Teledetección. Trabajo Fin de Grado. Ciencias Experimentales. Universidad Rey Juan Carlos (2019).
- European Space Agency. ESA Portal - Ice data at your fingertips. esa.int (2012).
- Fondriest Environmental, Inc. "Algae, Phytoplankton and Chlorophyll." Fundamentals of Environmental Measurements. (2014).
- Gómez, J. & Mercado, J. Tesis Doctoral. Evaluación del estado de eutrofización del mar Alborán mediante el empleo combinado de imágenes de satélite y de muestreos in situ. Doctorando. (2015).
- IGAC. Teledetección. Mejor. los Sist. Cartogr. del Territ. Colomb. (2007).
- Lozano, E. F. et al. Cianoalerta: estrategia para predecir el desarrollo de cianobacterias tóxicas en embalses. Ecosistemas. Rev. científica y técnica Ecol. y medio Ambient. 17, 37–45 (2008).
- Mas Monsonis, M. Uso de la teledetección y los SIG en la vigilancia de la calidad del agua: aplicación al mar menor. 165 (2017).
- Melgarejo, O., Ariza, A., Ramirez, H., Leon, H., Comparison of ATCOR Atmospheric and ELM Linear Empirical Correction Models Applied to WorldView-2 Images, TECCENCIA, Vol. 13 No. 25, 29-38, 2018.
- Monitorización de la calidad del agua en embalses mediante técnicas de observación remota (Water Quality monitoring in impoundments by means of remote observation technics) (2017).
- Nacional, R., Ambiental, D. T., Martínez, J., Martín, M. P. & Eds, I. Livro_Guia_teledeteccion_medio-ambiente_pliego_EspanholSensoriamentoRemoto.
- Quesada, A., Sanchis, D. & Carrasco, D. Cyanobacteria in Spanish reservoirs. How frequently are they toxic? Limnetica 23, 109–118
- Rodriguez, E; Suarez-Navarro, Jose; Gascó, Catalina; Schmid, T; Rodriguez, M. Radionuclide determination techniques and spectroradiometry as tools to determine soil erosion (2012).
- Roset, J., Aguayo, S; Mj, M. Detección de cianobacterias y sus toxinas . Una revisión. (2001).
- Shafique, N A., F A. Fulk, B C. Autrey, AND J E. Flotemersch. Hyperspectral Remote Sensing of Water Quality Parameters for Large Rivers in the Ohio River Basin. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 3, 4546–4562 (2003).
- Van der Merwe, D; Price, K. P. Harmful algal bloom characterization at ultra-high spatial and temporal resolution using small unmanned aircraft systems. Toxins (Basel). 7, 1065–1078 (2015).
- Viguria, A., Embarcados, S., Comunicaciones, S. De, Real, S. D. T. & Marea, G. T. Aviónica y Sistemas. 1–2 (2017).

Capítulo B.1.

Adafruit (s.f.): adafruit. URL: <https://www.adafruit.com/>.

- Ali, A., Ming, Y., Chakraborty, S. Iram, S. (2017): "A Comprehensive Survey on Real-Time Applications of WSN". En: Future Internet.
- Amazon IoT (s.f.): URL: <https://aws.amazon.com/es/iot/>.
- Apache (s.f.): URL: <https://httpd.apache.org/>.
- Arduino (s.f.): Arduino. URL: <https://www.arduino.cc/>.
- Bhende, M., Wagh, S.J. Utpat, A. (2014): "A Quick Survey On Wireless Sensor Networks". En: IEEE.
- Faludi. R. (2011): Building Wireless Sensor Networks.
- Farej, Z. y K., Abdul-Hameed, A.M. (2015): "Performance Comparison among (Star, Tree and Mesh) Topologies for Large Scale WSN based IEEE 802.15.4 Standard". En: International Journal of Computer Applications.
- Libelium (s.f.): Waspote. URL: <https://www.libelium.com/es/productos-iot/waspote/>.
- Libelium (2013): Data Frame. URL: https://www.libelium.com/wp-content/uploads/2013/02/data_frame_guide.pdf.
- Libelium (2019): Waspote Technical Guide.
- MariaDB (s.f.): URL: <https://mariadb.org/>.
- Morón-López, J-M., Rodríguez-Sánchez, M.C., Carreño, F., Vaquero, J., Pompa-Pernía, A.G., Mateos-Fernández, M., Pascual Aguilar, J.C. (2021): "Implementation of Smart Buoys and Satellite-Based Systems for the Remote Monitoring of Harmful Algae Bloom in Inland Waters". En: IEEE SENSORS.
- Oppermann, F.J., Boano, C.A., Kay Römer (2014): "A Decade of Wireless Sensing Applications: Survey and Taxonomy". En: The Art of Wireless Sensor Networks.
- Oracle (s.f.): URL: <https://www.oracle.com/es/database/what-is-a-relational-database/>.
- Raghavendra, C.S., Krishna, M., Sivalingam, Y., Znati, T. (2004): WIRELESS SENSOR NETWORKS.
- Ramson, S.R.J., Moni, D. j.(2017): "Applications of Wireless Sensor Networks - A Survey". En: IEEE.
- Seah, W.K.G., Eu, Z.A., Tan, H.P. (2009): "Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP) –Survey and Challenges". En: IEEE.
- Sohraby, K., Minoli, D., Znati, T. (2007): WIRELESS SENSOR NETWORKS: Technology, Protocols, and Applications.
- Soparia, J., Bhatt, N. (2014): "A Survey on Comparative Study of Wireless Sensor Network Topologies". En: International Journal of Computer Applications.
- Sparkfun (s.f.): Sparkfun. URL: <https://www.sparkfun.com/>.
- Thingier.io (s.f.): URL: <https://thingier.io/>.
- Thingsboard (s.f.): URL: <https://thingsboard.io/>.
- Xylem (s.f.): EXO3. URL: <https://www.yisi.com/exo3>.
- Xylem (s.f.): Storm3. URL: <https://www.yisi.com/storm3>.
- Xylem (s.f.): URL : <https://cloud.xylem.com/hydrosphere/>.
- Xylem (s.f.): Manual. URL: https://www.yisi.com/File%20Library/Documents/Specification%20Sheets/Storm_3-Brochure_-D15-11-0916-_.pdf.

Capítulo B.2.

- Álvarez, C. (22 de Junio de 2014): JPA vs Hibernate. Obtenido de genbetadev: <https://www.genbetadev.com/frameworks/jpa-vs-hibernate>

Álvarez, C. (31 de Agosto de 2014): ¿Qué es Maven? Obtenido de genbetadev: <https://www.genbetadev.com/java-j2ee/que-es-maven>

Álvarez, C. (12 de Agosto de 2014): ¿Qué es Spring Framework? Obtenido de genbetadev: <https://www.genbetadev.com/frameworks/que-es-spring-framework>

Alarcón, J. M. (23 de Octubre de 2017): ¿Qué es la máquina virtual de Java o Java Virtual Machine? (campusmvp) Obtenido de <https://bit.ly/2J4rKyd>

Álvarez, M. A. (02 de enero de 2014): Desarrolloweb. Obtenido de <https://desarrolloweb.com/articulos/que-es-mvc.html>

Android. (s.f.): IDE Android Sstudio. Obtenido de <https://developer.android.com/studio/>

Android. (s.f.): ¿Qué es Android? Obtenido de <https://definicion.de/android/>

APACHE. (s.f.): APACHE TOMCAT. Obtenido de <https://bit.ly/2NA9MqL>

Benites, A. G. (s.f.): ¿Qué es Bootstrap? (devcode) Obtenido de <https://devcode.la/blog/que-es-bootstrap/>

Benites, A. G. (s.f.): ¿Que és Java y por qué aprenderlo? Obtenido de <https://devcode.la/blog/que-es-java/>

Borillo, R. (8 de Marzo de 2012): Plantillas HTML5 en Java con Thymeleaf. Obtenido de <https://bit.ly/2lZ4s3v>

Cadenas, V. G. (6 de Julio de 2016): Retrofit 2. Obtenido de devacademy: <https://bit.ly/2KlRplu>

Capital, M. W. (s.f.): ¿Qué es 'iBeacon' y para qué sirve? Obtenido de <http://mobileworldcapital.com/es/2013/10/09/202/>

Chuburu, L. (s.f.): Qué es JQuery y cómo implementarlo. Obtenido de <https://bit.ly/2ub2ukg>

Comunidad Spring. (s.f.): Spring Initializr. Obtenido de SPRING INITIALIZR: <https://start.spring.io/>

Comunidad Spring. (s.f.): Spring Security. Obtenido de <https://spring.io/projects/spring-security>

Esepestudio. (s.f.): ¿Qué es MySQL? Obtenido de <https://www.espestudio.com/noticias/que-es-mysql>

Ferri-Benedetti, F. (21 de Septiembre de 2012): Softonic. Obtenido de <https://www.softonic.com/articulos/programas-lineas-codigo>

Hipertextual. (s.f.): Entendiendo HTML5: guía para principiantes. Obtenido de <https://bit.ly/2eOIkF0>

liemd. (s.f.): Qué es Google Maps. Obtenido de iemd: <https://iiemd.com/google-maps/que-es-google-maps-2>

Infsoft. (2005.302/): Infsoft Smart connected locations. Obtenido de <https://www.infsoft.com/>

Jarroba.com. (s.f.): Gson (JSON) en Java. Obtenido de <https://jarroba.com/gson-json-java-ejemplos/>

Javadesdecero. (s.f.): ¿Qué es JRE, para qué sirve y cómo funciona? Obtenido de <https://bit.ly/2u17fNQ>

Json. (s.f.): Introducción a JSON. Obtenido de <https://www.json.org/json-es.html>

OCU. (s.f.): Códigos QR: qué son y para qué sirven. Obtenido de <https://bit.ly/2eko0PE>

Olano, J. (2017): Workbench MySQL. Obtenido de <https://blog.pandorafms.org/es/workbench-mysql/>

Oterino, A. M. (06 de Junio de 2014): ¿Por qué Maven? Obtenido de <http://www.javiargarzas.com/2014/06/maven-en-10-min.html>

Penalva, J. (15 de Junio de 2017): NFC: qué es y para qué sirve. Obtenido de xataka: <https://www.xataka.com/moviles/nfc-que-es-y-para-que-sirve>

Spring. (s.f.): Spring Data. Obtenido de <https://spring.io/projects/spring-data>

Suite, S. T. (s.f.): spring. Obtenido de <https://spring.io/tools>

Ubuntu, C. (s.f.): S.O Ubuntu. Obtenido de <http://releases.ubuntu.com/16.04/>

URJC, A. T. (s.f.): Platform for automatic context-aware mobile services for m-tourism. Obtenido de GAT: <https://bit.ly/2MX1pEi>

W3C. (s.f.): ¿Qué es W3C? Obtenido de <https://www.w3c.es/Consortio/>

W3C. (s.f.): Validador de páginas web de W3C. Obtenido de <http://validator.w3.org/>.